



TITLE:

膨張コンクリートの水力発電用圧
力トンネルへの適用に関する研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

玉井, 摂郎

CITATION:

玉井, 摂郎. 膨張コンクリートの水力発電用圧力トンネルへの適用に関する研究. 京都大学, 1983, 工学博士

ISSUE DATE:

1983-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r5079>

RIGHT:

膨張コンクリートの水力発電用圧力トンネル
への適用に関する研究

昭和 58 年 5 月

玉 井 撰 郎

目 次

第 1 章 緒 論	1
1－1. ま え が き	1
1－2. 本研究の概要	2
第 2 章 従来の研究	5
2－1. 圧力トンネルの漏水防止工法に関する従来の研究	5
2－2. 膨張材に関する従来の研究	8
2－3. 膨張コンクリートのケミカルプレストレス導入に関する従来の研究	11
第 3 章 膨張コンクリートの力学的特性に関する研究	17
3－1. ま え が き	17
3－2. 圧力トンネル用ケミカルプレストレストコンクリートの適正配合の選定	17
3－3. はり供試体におけるケミカルプレストレスの評価	19
3－4. 弾、塑性変形特性に関する評価	22
3－5. ま と め	25
第 4 章 一軸拘束下でのケミカルプレストレスの評価に関する研究	46
4－1. ま え が き	46
4－2. 拘束膨張ひずみの予測方法および計算方法	47
4－3. 試 験 方 法	50
4－4. コンクリートの弾性係数、クリープ係数	51
4－5. ま と め	51
第 5 章 二軸拘束下でのケミカルプレストレスの評価に関する研究	57

5-1. ま え が き	57
5-2. 膨張の理論	57
5-3. 試 験 方 法	60
5-4. 試験結果および計算結果	62
5-5. ま と め	64

第6章 円筒型構造体におけるケミカルプレストレスの効果とその評価

に関する研究	74
6-1. ま え が き	74
6-2. 膨張の理論	74
6-3. 応力計算方法	78
6-4. 試 験 方 法	83
6-5. 試験結果および計算結果	85
6-6. ま と め	91

第7章 膨張コンクリートの圧力トンネルの設計への適用と施工例

7-1. ま え が き	127
7-2. 圧力トンネルにおける膨張コンクリートの設計	128
7-3. 圧力トンネルへの適用例	131
7-4. 施工上の留意点	135

第8章 結 論

159

第 1 章 緒 論

1-1. ま え が き

土木技術の進歩は、かつては技術的、経済的に建設が不可能であった地点にも構造物を築造することを可能にしてきた。これは材料の進歩と設計手法の発展があたかも車の両輪のように補いあって、新しい工法を開発させ発展させてきたためである。

著者もかつて水力発電工事に従事中、膨張コンクリートを用いた新しい工法に着想し完全に成功した経験がある。これらより、新工法については理論的、実験的研究の重要性を認識するとともに、新工法の開発により将来の水力発電所の設計にも大きく寄与しうるものと考えている。これが本研究着手への端著である。

本邦の水力資源については、昭和 56 年度末現在の包蔵水力は表 1-1 のとおりであり、大半は開発されつくしたがまだ相当に残されている。本邦の将来のエネルギー基盤は石油と原子力をベースとし、水力、石炭、LNG などで補うものと考えられており、風力、太陽熱、地熱などの新エネルギー源は現在研究されてはいるが、まだ期待しうるエネルギー源とはいえない段階である。水力は唯一の国産エネルギーといってもよく、最後の 1 Kw まで開発すべきものとする。ただし有利な地点はもはや枯渇しているので、どうしても工事費の増高を招きがちであるから、きめ細かい工夫によって工事費の低減に従来にもまして努力しなければならない。

水力発電における新技術、新工法の開発や、あるいは小水力設計の標準化など、工事費の低減に対する要求が現在ほど切実な時代は過去になかったものと思われる。

著者は既に述べたように関西電力^{しもことり}㈱において神通川水系、下小鳥水力発電所建設工事（昭 45～49）に従事した。ちょうど、石油ショックの時期で我国はその時点を契機として成長時代に大きな変換期を迎えた時代であった。

たまたま同工事中、導水路トンネルが遭遇した破碎地帯の対策について

1) 工期を遵守すること

2) 工事費の低減を計ること

というきびしい制約のもとで熟慮の末、思いきって膨張コンクリートを用いた「ケミカルプレストレス」工法を採用した。結果はその後の度の重なる断水検査によってこの工法が完べきな成功を収めたことが確認されており、その成果は特筆に値するであろう。

今後の水力発電は残存地点の減少という理由から多きを期待できぬとはいふものの、再開発 (SCRAP&REBUILD) も十分に考えられるし、また、原子力発電の余剰電力の吸収と負荷に即応できる Kw を重視する目的のために、今後大容量揚水発電所の建設が数多く実施されるであろう。したがって本研究は、膨張コンクリートを用いる水力発電用圧力トンネルの建設に際し、将来十分に活用しうるものとする次第である。

1-2. 本研究の概要

本研究は、次の各章からなっている。

第1章は緒論で、本研究着手の動機および研究の概要について述べる。

第2章は膨張コンクリートに関する従来の研究を総覧するとともに、圧力トンネルの形式、とくに漏水防止工法として埋設鉄管形式と覆工コンクリートにプレストレスを導入する工法について、その特長、実用例をあげ、膨張コンクリートを圧力トンネルに適用することの有効性を論じている。

さらに、膨張材に関する既往の研究報告についてはその発展の過程を概説する。また、膨張コンクリートの設計に際しては、ケミカルプレストレスの定量的な把握が必要であり、拘束膨張ひずみの予測、プレス効果の存在、クリープ特性に関する既往の研究報告を述べる。

第3章は膨張コンクリートの力学的特性について述べる。まず、圧力トンネルに膨張コンクリートを適用するため、その適性配合を決定する試験および結果について論じる。

また、はり試験によって、導入ケミカルプレストレスが拘束膨張ひずみ、鉄筋比および鉄筋の弾性係数の積で表わすことができることの確認を行うと

ともに、さらに膨張コンクリートの弾塑性的性質（弾性係数、クリープ係数）が時間関数の数式で近似できることを提案する。また、クリープについては外力によるものと膨張によるものに分割して、その特性について論及する。

第4章は一軸拘束下でのケミカルプレストレスの評価に関して論及する。

J I S A 6 2 0 2 B法で測定される一軸拘束膨張ひずをもとにし、弾性係数およびクリープ係数に時間を考慮して、一軸拘束下の膨張コンクリートの膨張現象を説明するとともに、ケミカルプレストレスの逐次計算手法を提案する。

第5章は二軸拘束下でのケミカルプレストレスに関して論及する。

多軸拘束下におけるケミカルプレストレスの定量化を目的とし、その第一ステップとして第4章で示した一軸拘束の理論展開に他方向からの膨張抑制作用および膨張移行を加えることにより、二軸拘束下の膨張現象を説明し、その逐次計算手法を提案する。

第6章は圧力トンネルのような円筒型構造におけるケミカルプレストレストコンクリートの効果とその評価に関して研究したもので、第5章の結果を踏まえて、円筒管（圧力トンネルモデル）における膨張コンクリートの膨張性状を2次元問題として捉え中空円で解析し、実験結果との比較検討を行う。

第7章は第3章から第6章の結果を踏まえ、膨張コンクリートを圧力トンネルに適用する場合の設計方法とその実施例について述べるとともに、膨張材を使用するに当たって施工上の留意点について述べる。

第8章は第3章から第7章までに得られた結果を要約するとともに、今後の検討事項について述べ、本論文の結論とする。

表1-1 包蔵水力

(通商産業省資源エネルギー庁 公益事業部水力課調べによる)

(昭和57年3月31日現在)

区 分		地 点 数	出 力(KW)	電力量(MWH)
既 開 発	一般水力	1,619	19,325,757	84,884,263
	混合揚水	19	5,526,640	2,403,851
	計	1,638	24,852,397	87,288,114
工 事 中	一般水力	68— 5	1,047,380	3,326,198
	混合揚水	1	200,000	195,251
	計	69— 5	1,247,380	3,521,449
未 開 発	一般水力	2717—278	12,083,501	41,185,885
	混合揚水	24— 16	9,173,720	1,647,045
	計	2741—294	21,257,221	42,832,930
計	一般水力	4404—283	32,456,638	129,396,346
	混合揚水	44— 16	14,900,360	4,246,147
	計	4448—299	47,356,998	133,642,493

ただし、包蔵水力の集計は、次の要目によって行った。

- (1) 既開発は、昭和57年3月31日現在のものであり、事業用は全部、自家用については出力、100kw以上について掲載した。
- (2) 工事中は、第87回(昭和57年3月26日)までの電源開発調整審議会において、着工を決定したものである。
- (3) 純揚水は、包蔵水力からはずし、集計していない。混合揚水は、発電力については、全出力を、発電量は自分流電力量のみを包蔵水力として集計した。
- (4) 地点数欄におけるマイナスの値は、新規開発によって廃止される既設発電所を表わす。

第2章 従来の研究

2-1. 圧力トンネルの漏水防止工法に関する従来の研究

圧力トンネルは、通常調整池式および貯水池式の水力発電所の導水路ならびに揚水発電所の導水路、放水路で用いられ、利用水深が大きく水路が長い場合などには高水圧を受けることになる。

このような内圧を受ける圧力トンネルの基本的タイプとしては、コンクリート巻立トンネル、内張鉄管形式の2つに大別することができる。堅硬な岩盤地帯であれば稀ではあるが素掘トンネルの場合もある。

いずれの形式のトンネルを採用するかについては、トンネル通過部の地形・地質、作用水圧、施工性を考慮し、作用水圧によるトンネルの耐圧性、トンネルからの漏水による地山の安全性に関する技術的検討ならびに建設工事費に関する経済性の検討を行い、総合的な評価を加えて決定するものである。

とくに、地山かぶりの薄い場所あるいは地質状態が良くない場所を高水圧トンネルが通過する場合においては、細心の注意が必要でトンネルからの漏水が周辺地山の安定を損い、これを破壊する可能性があるため、安全対策上漏水防止に重点をおき、これに適した工法を選定しなければならない。

この漏水防止工法としては、内張鉄管工法と覆工コンクリートにプレストレスを導入しクラックの発生を防止する工法とがある。

内張鉄管工法は、充水後の漏水に対する懸念もなく最も安定した形式であり、水衝圧が発生するような高水圧トンネルではこの形式が安全である。

しかし、コンクリート巻立トンネルと比較して内張鉄管形式は建設工事費が高く、またトンネル内での鉄管の据付、溶接等施工性が悪いため工程に問題が生じやすい。内張鉄管工法を採用する場合には、設計・製作・据付の総合的なスケジュールを決め、予定工期を確保するための工程管理・品質管理をとくに充分に行う必要がある。また地質が悪く、工事途中で巻立コンクリートから内張鉄管への設計変更がしばしばおこってくるが、これは工程的に不可能なことが多い。

一方、覆工コンクリートにプレストレスを導入する工法には、次の3つの方法がある。

- ① 覆工コンクリート周囲へのセメントミルクおよび膨張セメントミルクを注入する方法。
- ② コンクリートに機械的にプレストレスを与える方法。
- ③ 膨張コンクリートを使用し、この膨張力を鉄筋によって拘束しコンクリートに化学的にプレストレスを導入する方法。

①の方法は締付けグラウトと呼ばれる工法で、岩盤の拘束力を利用して岩盤と巻立コンクリートとの間に圧力注入をすることにより、外側から巻立コンクリートにプレストレスを導入し覆工コンクリートを締付けようとするものである。

この工法を採用した例としては Lech 揚水発電所の Rosshaupten トンネル¹⁾（内径 8.35m、内圧 5.0%）がある。ここでは、コアリング工法による施工法を採用し、グラウト注入圧 6% に対しプレストレスを 61% 導入したことをコンクリートひずみの測定により確認している。

また、関西電力²⁾黒部川第4発電所の圧力トンネル（内径 4.8m、延長10.3km、設計内圧 15%）においてもグラウト注入工法を採用し、巻立コンクリート内にストレイナーを埋め込みプレストレスを測定した結果、その有効性が確認されている。

しかし、この工法は周辺岩盤の力学的特性と注入材料の特性によって導入プレストレスは大きく変化するので、岩盤の地質特性の変化が大きいわが国では、この方法を採用する場合は十分な調査検討を要する。とくに、長期間にわたって安定したプレストレスを確保することができるかどうかは岩盤のクリープ特性、弾塑性特性に大きく依存するため、この点について慎重な調査研究が要求される。

また、注入材料に膨張セメントを採用し、膨張性を利用して締付効果をあげ、覆工コンクリートにプレストレスをより安定して導入する場合もあるが、普通のグラウト工法と同様に周辺岩盤の力学的特性に依存するため、岩盤の

調査内容および力学的取扱いはなんら変わるところがなく慎重な検討が必要である。

②の方法は通常、ピアノ線で環状に締付ける方法が取られ、あらかじめ製作された円形覆工の各单位管に対して、工場で締付ける工法と現場で締付ける工法がある。この例としては、Piastra - Andonno 水力発電所（イタリア）の導水路トンネル（内径 3.3m、内圧 8.16%）、Taloro 揚水発電所（イタリア）の導水路トンネル（内径 5.5m、内圧 9%）、Grimsel 揚水発電所（スイス）の導水路トンネル（内径 6.8m、内圧 7.7%）と放水路トンネル（内径 6.8m、内圧 14.3%³⁾）等がある。また、フラットジャッキを岩盤と覆工の間に据付けてプレストレスを導入した例もあるが、回転対称のプレストレスを生じないことおよびプレストレスをかける位置の中間部分ではかなりの偏心を考慮する必要があるため採用された例は少ない。

また、このように②の工法は施工方法が複雑であり、建設費も高いため外国でも適用例が少なく、わが国ではいまだ用いられていない。

③の方法は従来の鉄筋コンクリート巻立工法と構造・施工面においてとくに変わりがないため、最も容易な方法である。また、図 2-1 に見られるように、膨張コンクリートの工事費は内張鉄管よりも安く、かつ工程的にも内張鉄管よりもはるかに有利であるため、膨張コンクリートを圧力トンネルに採用することにより水力発電所の経済性を高め、発電原価の低減に寄与するであろうと考えられる。このことが端著となって筆者らはこの研究を開始した。

この工法の我国最初の圧力トンネルへの応用例は、筆者らが設計施工した^{4), 5)} 関西電力㈱下小鳥発電所（1973年5月運開）の導水路トンネルであり、その後、山梨県早川第一発電所導水路トンネル（修繕工事）、福井県企業庁真名川発電所導水路トンネル⁶⁾においても実施されている。なお、下小鳥発電所においては、その後10年経過した現在においても水路点検によってなんら異常もなく当初の目的を完全に達成していることが実証されている。一方、外国においても本工法が水路トンネルに採用された例についてはいまだに報告例がない。

最近の研究によって、膨張材と膨張コンクリートに関する力学的特性が明らかとなり、長期的にも安定したプレストレスが得られるようになっている。

したがって、膨張コンクリートを圧力トンネルに採用し、ケミカルプレストレスを導入する工法は圧力トンネルの漏水防止工法として最も経済的で有効な工法であると考えられる。

2-2 膨張材に関する従来の研究

膨張材（膨張セメントと全意義に使われることもある。）の発展は、セメントの水和反応過程で生成されるエトリンガイト（化学式 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ）の研究が起源であるといえる。1890年、C. Candlot⁷⁾はアルミン酸三石灰（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ）と石膏（ CaSO_4 ）との反応によってエトリンガイトが得られると報じたのを端緒とし、1892年、W. Michaelis⁸⁾はエトリンガイトは硫化物と共存する環境に置かれた場合、ポルトランドセメントコンクリートの膨張破壊の原因となるので、望ましい生成物でないと指摘した。しかし、1930年に至って H. Lossier⁹⁾はエトリンガイトの膨張力はコンクリートの乾燥収縮を相殺する能力があり、また膨張力を利用してコンクリートに化学的にプレストレスを導入することが可能であると報告し、エトリンガイトの生成はコンクリートにとって必ずしも有害ではないことを示した。この膨張セメントは石膏、ボーキサイト、生石灰の混合スラリーを焼成した膨張材と高炉スラグとをポルトランドセメントに混合したものであり、スラグは膨張抑制材として含まれていた。しかし、H. Lafuma¹⁰⁾はエトリンガイトの成長はポルトランドセメントと無水石膏の混合物の水和時に生じるので、Lossierの製造法（珪酸石灰： $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ とアルミン酸石灰： $5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ を主成分とする）は本質的でないと主張した。

一方、ソ連においては V. Mikhailov¹¹⁾を中心に高アルミナセメントと石膏とを混合する形式の膨張セメントの開発が行われ、補修・防水コンクリート用およびケミカルプレストレス用の2つの異なるコースがとられている。また、アメリカでは A. Klein¹²⁾らにより、ボーキサイト、石灰、石膏の混合物を1,300℃で焼成する方法で得られる安定した無水のカルシウムサルフォアルミネー

ト（略してCSA）の形成を基本として研究が行われた。わが国でもこれと同種の膨張材の開発研究が1950年代より開始され、1965年鋼管ライニングモルタルの収縮ひびわれ防止に使用されたのを機に多方面で利用され、次いでヒューム管・ボックスカルバートに対するケミカルプレストレスの研究も開始され、年とともに膨張材の利用が増している。また、水力発電所では膨張特性に着目し、膨張コンクリートを高落差の水圧鉄管路のてん充コンクリートに使用し、水圧の岩盤負担率の向上を計る研究も行われ、関西電力¹³⁾ 奥多々良木発電所に使用された例もある。

現在、膨張セメントとよばれるものは、セメントの硬化中または硬化後にその絶対容積を増加させるものを指し、その種類としては次の3つのタイプ¹⁴⁾に分類される。

(1) Kタイプ

別に焼成したアウイン($3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4$)を普通ポルトランドセメントに混合または添加したもの。

(2) Mタイプ

ポルトランドセメントにカルシウムアルミネートおよび石膏を混合したもの。

(3) Sタイプ

アルミン酸三石灰($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)を多量に含むポルトランドセメントに石膏を混合したもの。

これら3つのタイプは、いずれもエトリンガイトを膨張の基本としたものであり、その基本素子は石灰(CaO)、アルミナ(Al_2O_3)、石膏(CaSO_4)の3つの成分となっている。

わが国で市販されている膨張材は、CSA系と石灰系の2種類がある。CSA系のものはKタイプと類似するもので、電化CSA、タスコン（電気化学工業K.K）とアサノジブカル（日本セメントK.K）があり、また石灰系のものとしてはSタイプの変形と考えられるエキспан（小野田セメントK.K）がある。

なお、本研究で使用した膨張材は電化 C S A # 20 であり、その水和反応機構を図 2 - 2 に示す。

2-3. 膨張コンクリートのケミカルプレストレス導入に関する従来の研究

現在、膨張コンクリートをケミカルプレストレス導入の目的で利用しているのは、大部分ヒューム管、ボックスカルバートなどの製造管理を行い易い工場製品に対するものが大部分であるが、今後は現場打ちコンクリートも含めて、各種の鉄筋コンクリート構造物にケミカルプレストレスを利用することは耐張力に欠けるというコンクリートの力学的特性を著しく改善でき、さらに経済性にも優れたものとなしうると考える。

しかしながら、ケミカルプレストレスの導入量は膨張材量、拘束条件だけでなく、コンクリートの配合、養生によって変化し、さらに最終的に得られる有効プレストレスはコンクリートのクリープ、乾燥収縮特性によって大きく異なり、ケミカルプレストレスを合理的に利用するためには、これらの特性について定量的に解明する必要がある。

一般的に膨張コンクリートのケミカルプレストレスは、機械的に導入されたプレストレスと同等に取扱うことが可能であり、その量は（拘束膨張ひずみ）×（鉄筋の弾性係数）×（鉄筋比）で算出できるとされている。したがって、ケミカルプレストレス導入を設計するためには、膨張ひずみを正しく予測することが必要となる。

予測に関する従来の研究としては拘束鋼材を一軸方向に、断面对称に配置した場合については、有効自由膨張量の概念に基く推定方法（六車他¹⁵⁾）、自由膨張量を基礎にした微小時間についての逐次計算手法（戸川他¹⁶⁾）、潜在膨張量の概念を導入した膨張コンクリートの複合モデルによる推定（岡村他¹⁷⁾）等の研究報告が見られる。

また、辻は単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束鋼材に対してなす仕事量の概念に基き、コンクリートの配合および養生条件が同じであれば鉄筋比およびその配置方法にかかわらず、この仕事量は一定値であるとの仮定よりケミカルプレストレスを推定する方法を提案している。

多軸拘束の場合、定性的には一方向に拘束することによりこれと直角方向の膨張は減少することが知られているが、これに関する研究報告は数少く、

各研究者による結論も異ったものである。たとえば、辻・長滝¹⁹⁾らは上述の仕事量の概念を拡張した方法により、その膨張ひずみの予測方法を提案しており、飯田²⁰⁾他は円筒供試体による実験から円周方向の有効鉄筋比に対する管軸方向の有効鉄筋比の比を 0.3 以下にすることにより円周方向に高いプレストレスを導入でき、はり試験からは主軸方向の鉄筋比を一定とした場合直角方向の鉄筋比が小さいほど主軸方向に高いプレストレスが導入されると報告している。

膨張コンクリートのクリープについては、岡田²¹⁾他はみかけの終局クリープ係数は湿潤養生・膨張セメントの混入量 $4.9 \sim 6.7 \text{ kg/m}^3$ において普通コンクリートと同程度の 1.0～1.5 の範囲にあり、残留有効プレストレスの比率は 83% 以上と報告しているが、戸川²²⁾他は同様の条件下での終局クリープ係数は一軸拘束の場合 2.2～3.3、密封三軸拘束（円筒形）の場合 1.7 になり、普通コンクリートよりも大きいと述べている。

また、膨張コンクリートにおいては、材令初期からコンクリートの膨張が始まり、これを拘束することによってコンクリートのプレストレスは徐々に大きくなるため、この場合に発生するプレストレスは既にそれまでに生じたコンクリートのクリープおよび弾性変形の影響を受けており、ケミカルプレストレスが導入された時点において、その応力状態でのクリープの一部が既に終了している（プレクリープの存在）と推定される。また、膨張が終了した時点すなわちプレストレスの導入が終了した時点以降においても拘束を解除すると再び膨張するという報告もあり²³⁾、膨張が平衡状態になったと見えるのはコンクリートに作用しているケミカルプレストレスによるクリープや弾性変形と膨張がバランスしていることによるためであると考えられる。

さらに、多軸拘束の場合には河野²⁴⁾他が報告しているように、養生期間中に生じた膨張力の一部が鉄筋により拘束され、コンクリートを圧密しコンクリート中の空隙部を減少させることによって強度の改善作用がある、つまりケミカルプレス効果が存在するとされている。

したがって、ケミカルプレストレスの導入経過を明確にし、その予測をす

るためにはクリープおよび弾性変形を考慮した解析が必要であり、多軸拘束下の場合にはケミカルプレストレスのみならず、ケミカルプレス効果の解析が必要である。

本論文では膨張コンクリートのケミカルプレストレスおよびケミカルプレスについて実験的に研究を行うとともに、ケミカルプレストレスを推定する方法として、一軸拘束下の膨張ひずみをもとにクリープおよび弾性係数に時間関数を考慮した逐次計算手法を提案し、さらにこれを二軸拘束下に拡張し円筒形に適用し、膨張コンクリートを用いた場合の圧力トンネルの設計方法を提案するものである。

第 2 章 参考文献

- 1) 金原 訳 ; トンネルの力学、森北出版、1976. 11. 15
- 2) 関西電力^株編集 ; 黒部川第四発電所工事誌、1966. 4. 25
- 3) 大成建設^株 ; V S L 工法を用いた P C 圧力トンネル—施工例集—、1982. 8
- 4) 玉井 撰 ; 発電用導水路トンネルにおける膨張コンクリートの応用実験について、コンクリート工学、Vol. 13, No. 4, April 1975
- 5) 玉井 撰 ; 下小島発電所、導水トンネルの「ケミカルプレストレス」工法、発電水力、No. 131, 1974. 7
- 6) 土木学会 ; 膨張コンクリート設計施工指針(案)膨張コンクリート資料集、コンクリートライブラリー第45号、1979. 11
- 7) Candlot, C., Bulletin, Societe d'Encouragement pour L'Industrie Nationale, V. 5, 1890. p.682
- 8) Michaelis, W., Tonindustrie — Zeitung (Goslar), V. 16, 1892, p.105
- 9) Lossier, H., and Caguot, A., “ Expanding Cements and Their Application — Self — Stressed Concrete ” Le Genie Civil(Paris), V.121, No. 8, Apr. 15, 1944, p.61—65 and No. 9, May 1, 1944, p.69—71
(in French)
- 10) Lafuma, H., “ Expansive Cements ”, Proceedings, Third International Symposium on the Chemistry of Cement (London, 1952), Cement and Concrete Association, London, 1954, p. 581—597
- 11) Mikhailov, V., “ Stressing Cement and the Mechanism of Self — Stressing Concrete Regulation ”, Proceedings, Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington, D. C., V.2, 1960, p.927—955 (National Bureau of Standards, Monograph 43, 1962)
- 12) Klein, A., and Troxell, G. E., “ Studies of Calcium Sulfo-alminate Admixtures for Expansive Cements ”, Proceedings, ASTM, V. 58, 1958 p.986—1008

- 13) 錦織達郎 ; 膨張コンクリートの内張鉄管への利用に関する基礎的研究、土木学会論文報告集第262号、1977.6
- 14) 長滝重義訳 ; 膨張セメントコンクリートの現況(1)~(5)、コンクリートジャーナル、Vol.10、No.1~No.5、1972
- 15) 六車 熙 ; C S A コンクリートの有効膨張ひずみに関する研究(第1報)、1965
- 16) 戸川一夫、荒木謙一 ; 膨張セメントコンクリートのケミカルプレストレスに関する研究、プレストレストコンクリート、April、1972
- 17) 岡村 甫、国島正彦 ; 膨張コンクリートの複合モデル化について、セメント技術年報、1973
- 18) 辻 幸和 ; コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究、土木学会論文報告集、第235、1975年3月
- 19) 長滝重義、遠藤達已、河村彰男 ; 多軸拘束を受ける膨張コンクリートの膨張性状、第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1982
- 20) 飯田秀雄、門司 唱 ; ケミカルプレストレスを導入する鉄筋コンクリート管の拘束条件に関する研究、土木学会論文報告集、第225号、1974年5月
- 21) 岡田 清、平沢征夫、陳 哲光 ; 膨張セメントコンクリートのセルフプレストレスおよびクリープに関する一実験、土木学会論文報告集、第223号、1974年3月
- 22) 戸川一夫、中本純次 ; 膨張セメントコンクリートのクリープ乾燥収縮特性、セメント技術年報、32、1978
- 23) 岡村 甫 池内武文 ; 膨張コンクリートを用いた曲げ部材におけるクリープの影響、セメント技術年報、31、1977
- 24) 河野俊夫、一家惟俊、野呂正治、右田純一郎 ; 石灰系膨張材を混和したコンクリートのケミカルプレストレスとケミカルプレストレスに関する検討、セメント技術年報、26、1972

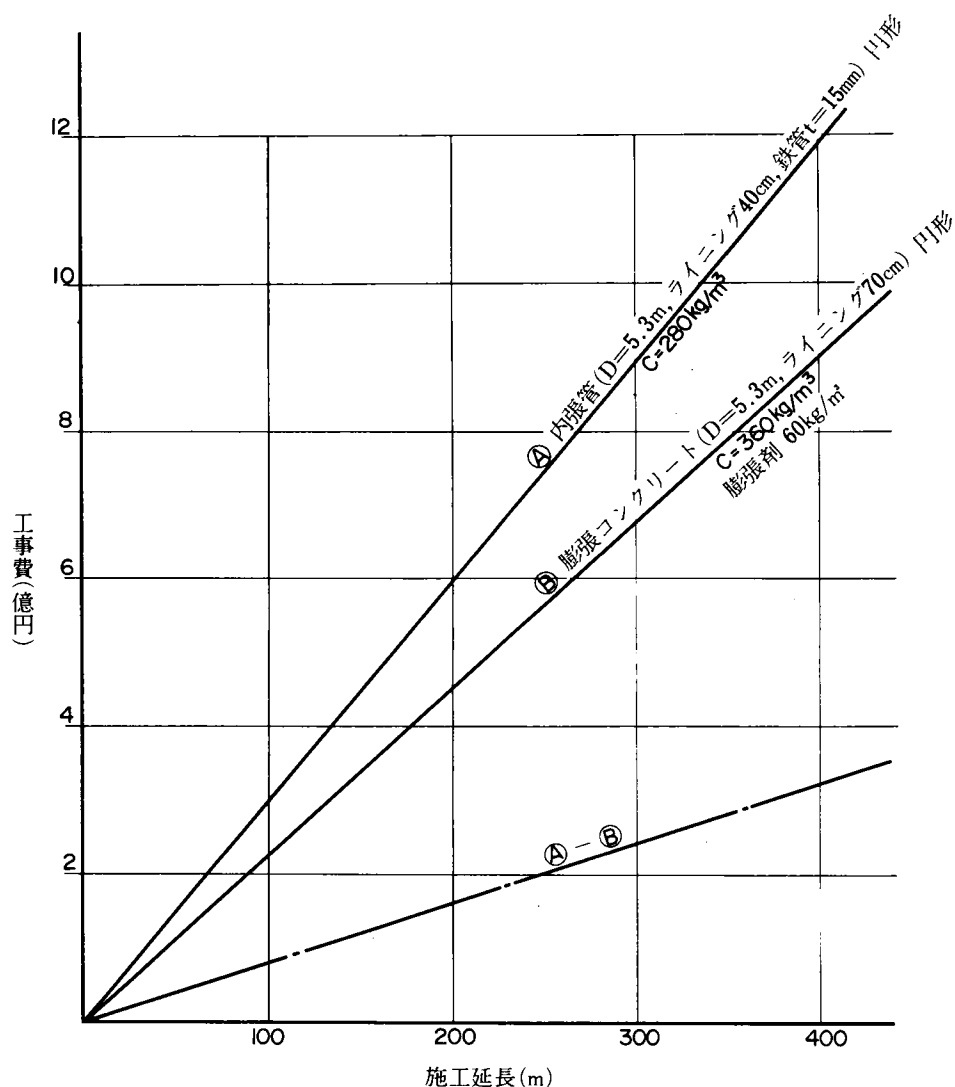


図 2-1 導水路トンネル工事費比較 (55年度時点)

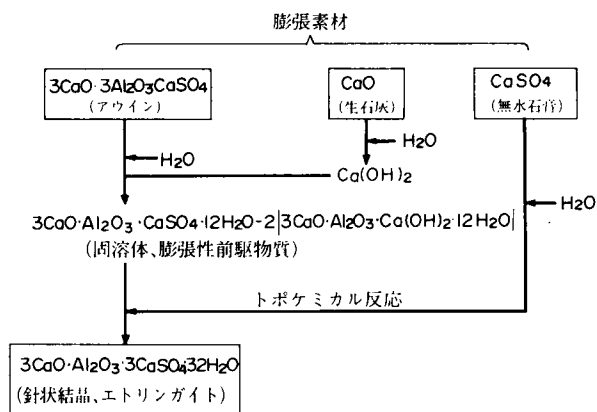


図 2-2 膨張セメントの水和反応機構図 (Typek)

第3章 膨張コンクリートの力学的特性に関する研究

3-1. ま え が き

膨張コンクリートの力学的特性は使用材料、拘束条件、養生条件など多数の要因によって影響をうけるが、ケミカルプレストレスの導入を目的とする膨張コンクリート、すなわちケミカルプレストレストコンクリートの場合、とくに膨張材の配合が重要である。一般的にはケミカルプレストレスを有効に導入しうるような単位膨張材量としては、コンクリート1 m^3 当り50%～70%程度が適当と考えられる。土木学会でまとめられた膨張コンクリート設計施工指針(案)においても配合等について具体的な条項はなく、実際にケミカルプレストレストコンクリートを用いる際には過去の配合実例を参考に定められているのが現状である¹⁾。

本章において水路用の圧力トンネルに使用されるケミカルプレストレストコンクリートを対象に考えてコンクリート28日圧縮強度 σ_{28} 300%以上、かつ湿潤条件下で部材としての引張強度 σ_t 50%以上の強度条件を満足するコンクリートを得るための配合を一種選定して適正配合とし、その弾塑性変形特性を明らかにするとともに、はり供試体によりケミカルプレストレスの効果について検討する。

3-2. 圧力トンネル用ケミカルプレストレストコンクリートの適正配合の選定

1) 概 要

土木学会の膨張コンクリート設計施工指針(案)のケミカルプレストレストコンクリート設計要領(案)では、JIS A 6202法によって測定される拘束膨張ひずみが 25×10^{-6} 以上、 50×10^{-6} 以下を標準とするとなっているが、圧力トンネルへケミカルプレストレストコンクリートを適用する場合の条件として導入ケミカルプレストレスとして20%程度を想定した場合、同法による拘束膨張ひずみは $1,000 \times 10^{-6}$ 程度必要となる。そこで単位セメント量と300 kg/m^3 から380 kg/m^3 、単位膨張材量を0から70 kg/m^3 まで変化させた各種の配合で膨張測定試験、圧縮試験を行い、

その結果から適正なものとして3種類の配合をとりあげ、これらにつきさらに詳細な試験を行った。

2) 使用材量

- セメント：電気化学工業株式会社製普通ポルトランドセメント。物理化学的性質を表3-1に示す。
- 膨張材：デンカCSA#20。エトリンガイド系膨張材。物理化学的性質を表3-2に示す。
- 粗骨材：黒部川産砂利、比重2.61、吸水率0.9%、F.M 7.14
粗骨材最大寸法25mm。
- 細骨材：黒部川産川砂。比重2.52、吸水率1.3%、F.M 2.59
- 減水剤：ポゾリスNa5L、溶液比重1.0
セメント量の1%使用

3) 測定方法

試験は膨張測定試験と圧縮強度試験からなる。前者についてはJIS A 6202 B法に従って測定を行った。後者については、膨張コンクリートの場合、拘束条件によって強度性状が異なるので型枠中で試験材令まで養生を行った。²⁾

4) 実験結果

単位セメント量 $C=300\sim380\text{ kg/m}^3$ 、単位膨張材量 $CSA=0\sim70\text{ kg/m}^3$ 、スランプ8~15cmとしたときの各配合の膨張特性、強度特性を表3-3に示す。これより膨張特性、強度上適正配合として再検討すべき配合3種 $C-CSA=340-60$ 、 $360-60$ 、 $380-70$ をとりあげ、膨張、強度試験を行った結果を表3-4、表3-5に示す。これより圧縮強度300%以上でかつ拘束膨張ひずみが $1,000\times 10^{-6}$ 以上あり、最も健全なコンクリートを得る可能性があるものとして単位セメント量 C と単位膨張材量 CSA の比が $360-60$ の配合を適正配合として選んだ。以後の一連の実験はすべてこの配合を中心として行った。この配合では水結合材比($W/C+E$)は38%で、水セメント比は45%である。ただし、本研究では基

本的には膨張材を結合材としてみなさないものとする。表 3-6 に決定した示方配合を示す。

3-3. はり供試体におけるケミカルプレストレスの評価

1) 概 要

ケミカルプレストレスはコンクリートに発生する膨張圧を鋼材等で拘束することにより導入されるが、この際コンクリートの組織自体もケミカルプレストレスの影響を受ける。このことを考えると、部材中でのケミカルプレストレスの作用効果について明らかにする必要がある。そこで構造部材としては、最も基本的な形態である鉄筋コンクリートの矩形断面はりを用いてはりの曲げ試験によるひびわれ発生荷重とその変形挙動を普通コンクリート、機械的なプレストレス導入はりのそれと対比し、部材におけるケミカルプレストレスの作用を明らかにする。

2) 供試体および使用材料

供試体は膨張材を用いないが、単位セメント量同一の普通コンクリートでつくったはり（P シリーズ）、ケミカルプレストレストコンクリートはり（CSA シリーズ）、P シリーズと同様、普通コンクリートで製作し機械的にプレストレスを与えたはり（P-PC シリーズ）の 3 種類とし、供試体寸法としては $30 \times 30 \times 300$ cm。拘束鉄筋としては D16mm と D19mm を用いた複鉄筋（ $A_s = 13.67 \text{ cm}^2$ 、 $p = 1.52\%$ ）とし、スターラップは D13mm を 20cm 間隔に配置した。供試体の名称と種類を表 3-7 に、また供試体寸法・配筋の詳細図を図 3-1 に示す。P-PC シリーズについては載荷直前（材令 28 日）にプレストレスを機械的に与えた。導入にあたっては P シリーズ、CSA シリーズに用いているものと同種の異形鉄筋をはり中に設置したシースにそう入し、鉄製エンドプレートに片側のみナットで固定定着し、もう一方は固定せず導入用鉄板を一枚介してナットで仮締し、この導入用鉄板の中央部には内側にネジ切りをした突出部があり、この部分を油圧ジャッキに PC 鋼棒で結合し鉄製のチェアーを介して 6 本同時に緊張した。緊張量は鉄筋にはりつけたストレインゲージで確認しながら行っ

た。緊張ひずみははりの膨張ひずみ量と対応させるため 500, 600, 700, 800×10⁻⁶ の 4 種とし、緊張後急硬性グラウト材（デンカハイトスコン）を用いグラウトを行った。また、はり供試体の示方配合を表 3-8 に示す。使用鉄筋の材質は引張試験の結果全て SD 35 を使用した。その他の使用材料は 3-2、2）と同一である。

3) 実験方法

3 種のはりに対し所定材令においてスパン 280cm で単純支持の静的曲げ載荷試験を行った。載荷は 2 点載荷とし a/d （せん断スパン長 / 有効高さ）は 5.0 である。荷重は 0.25 トンずつ増加の繰り返しとし、第 1 荷重段階は初期ひびわれ発生後、引張鉄筋ひずみの値が $1,000 \times 10^{-6}$ に達する直前の荷重とし、次にこの荷重から除荷した。その後は、はりの上縁が圧潰し荷重があがらなくなるまで 0.5 トンの荷重間隔で載荷を行った。なお、供試体への導入ケミカルプレストレス推定のためはりの主鉄筋に鉄筋計（共和電業社製 BF-16C）でコンクリート打込み直後から載荷材令までにおける主鉄筋の膨張ひずみの測定も行った。

4) 試験結果

はり供試体と同時に作製し、同様に湿布または気乾養生を行った圧縮強度用円柱供試体（ $\phi 10 \times 20$ cm）曲げ強度用角柱供試体（ $10 \times 10 \times 40$ cm）引張強度用円柱供試体（ $\phi 15 \times 15$ cm）を用いて求めた供試体コンクリートの各種強度、弾性係数、ポアソン比についての測定結果を表 3-9 に示す。なお、ここで各種強度試験用供試体は全て湿布、気乾養生条件下ではり供試体の載荷時材令まで型枠中で養生したものである。

各はり供試体のひびわれ発生荷重 P_{cr} 、最終耐力 P_{max} の測定結果を表 3-10 に示す。P-PC シリーズはりの載荷時材令は全て 28 日である。

5) ケミカルプレストレスの評価

はりに導入されるケミカルプレストレス σ_{cp} は、はりの主鉄筋の平均拘束膨張ひずみ ϵ_{se} から次式で求められる³⁾。

$$\sigma_{cp} = \frac{\epsilon_{se} \times E_s \times A_s}{A_c} = \epsilon_{se} \times E_s \times p \quad \cdots \cdots \cdots (3-1)$$

ここで、 E_s : 鉄筋弾性係数 ($2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)

A_s : 鉄筋断面積

A_c : コンクリート断面積

p : 鉄筋比

一方、静的載荷試験において CSA シリーズはりの引張鉄筋ひずみに注目すると、ひびわれ発生後一度除荷した後の再載荷による上昇曲線には図 3-2 に示すような処女上昇曲線と平行な区間が存在する。これはケミカルプレストレスによってひびわれが閉合し、はり下縁応力がケミカルプレストレス値と等しくなるまで全断面が有効に作用するためと考えられる。この全断面有効区間の上限荷重を P_e として図 3-2 に示すように定めると実際に作用していると考えられるケミカルプレストレス σ_{cpe} は次式で求められると考えられる。

$$\sigma_{cpe} = \frac{M_e}{I_e} \times y \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

$$\text{但し、} M_e = \frac{P_e \times a}{2} + \frac{1}{8} \left(\frac{W}{\ell} \right) \cdot \ell^2$$

ここで、 a : せん断スパン長 (cm)

I_e : はりの換算断面 2 次モーメント (cm^4)

y : はり断面重心軸より引張縁までの距離 (cm)

W : はり自重+載荷 I ビーム重量 (kg)

ℓ : はりの長さ (cm)

(3-1)、(3-2) 式による計算結果ならびに σ_{cp}/σ_{cpe} の値を表 3-11 に示すが、これによれば σ_{cp}/σ_{cpe} の値はほぼ 1 となり (3-1) 式で計算されるケミカルプレストレスがほとんどすべてプレストレスとして作用しており、測定された拘束膨張ひずみのほとんどすべてがケミカルプレストレスの発現に有効に寄与していることが認められる。また、ケミカルプレストレスの影響についてみると機械的にプレストレスを与えたのと同様にはり部材の力学的性状を向上させていることも認められる。

次に CSA シリーズはりのひびわれ発生応力 $\sigma_{cr, CSA}$ 、導入ケミカルプレストレス σ_{cp} と同材令同養生の P シリーズはりのひびわれ発生応力 $\sigma_{cr, p}$ の関係についてみると表 3-12 に示すようにおおよそ次式が成立するようである。

$$\sigma_{cr, CSA} \div \sigma_{cr, p} + \sigma_{cp}$$

この式は、CSA シリーズはりのひびわれ発生応力は P シリーズはりのひびわれ発生応力に導入されたケミカルプレストレスを加えたものにほぼ等しいということを示している。すなわち、このはりのような配筋状態すなわち一軸拘束状態下（腹筋を有するため完全な一軸拘束ではないがこの程度の腹筋量であれば一軸拘束とみなしても良いと思われる）ではケミカルプレストレスによってコンクリートマトリックスの組織的な変化があったとしても部材としての力学的挙動には大きな影響を与え得ず、膨張破壊さえ生じていなければ（3-1）式で部材に対して有効に作用するケミカルプレストレス量は算出できると考えられる。

3-4 弾・塑性変形特性に関する評価

3-4-1 クリープ特性

1) 概要

膨張コンクリートの拘束膨張ひずみに起因して発生するケミカルプレストレスを定量的に把握するためには時間関数となるクリープ係数の把握が必要である。膨張コンクリートのクリープを考える場合、初期材令すなわち拘束膨張ひずみが平衡状態に到るまでのクリープと拘束膨張ひずみが平衡状態に到ってからのクリープの2種を考える必要があると考えられる⁴⁾。本試験では前者を初期クリープ、後者を外力クリープと呼ぶこととして2種類の実験を行った。

2) 使用材料ならびに供試体

コンクリートの配合は表 3-6 に示すものと同じである。初期クリープ供試体は $10 \times 10 \times 40$ cm 角柱供試体、外力クリープ供試体は $15 \times 15 \times 50$ cm の角柱供試体の2本連結体である。その略図を図3-3に示す。

3) 初期クリープ試験

膨張コンクリートの膨張は特にコンクリートが若材令で一次的な膨張性水和生成物ができるまでのコンクリートの性質に依るところが大きい。そこで材令 14 日程度までのクリープ特性を調べようというのが本実験であり、上述した供試体に材令 1 日および 7 日でコンクリート組織を破壊することのないような応力として 10 % の応力を導入しクリープ試験を行った。供試体はすべて湿布散水養生とし、コントロール供試体としては応力を導入しない供試体をこれにあてた。クリープ係数の算定にあたっては図 3-4 に示す方法に従って行った。

4) 外力クリープ試験

外力クリープ試験は、膨張が一次的に終了した後の外力負荷に対応するクリープ特性を明らかにする目的で行った。要因として、養生条件、拘束鉄筋比の 2 つをとりあげた。すなわち、養生条件としては湿布散水養生 (20℃) (記号 W) と材令 14 日まで湿布散水養生以降気乾 (20℃、65% R.H.) (記号 S) の 2 種、拘束鉄筋も $\phi 17\text{mm}$ 、 $\phi 23\text{mm}$ の 2 種とした。応力としては 100 % (ケミカルプレストレス + 外的導入応力) を、材令 14 日および 28 日で導入した。なお、応力のチェックは鋼棒のひずみで行った。供試体種類、試験条件を表 3-13 に示す。初期クリープ試験と同様に応力を導入しない供試体をコントロール供試体とし、クリープ係数 φ_t の算定は次式によって行った。

$$\varphi_t = \frac{\text{応力導入供試体ひずみ} - \text{コントロール供試体ひずみ}}{\text{導入時の弾性ひずみ}}$$

5) 試験結果

5) - 1 初期クリープ

供試体の膨張ひずみと材令との関係を図 3-5 に示し、クリープ係数と材令の関係を図 3-6 に示す。

5) - 2 外力クリープ

湿布散水養生のみかけのクリープ係数と材令の関係を図 3-7、湿

布散水養生以後気乾養生の同関係を図 3-8 に示し、導入時の弾性ひずみを表 3-14 に示す。みかけの乾燥収縮ひずみについて、拘束鉄筋を変換しない CSA, P の乾燥収縮と材令の関係を図 3-9 に、拘束鉄筋を変換したものとしなない CSA の同図を図 3-10 に示す。また、湿布養生のコントロール供試体のひずみと材令の関係を図 3-11 に示し、クリープ係数 φ_t を

$$\varphi_t = \frac{t}{A + B \cdot t} \quad t: \text{材 令}$$

と近似したときの実験定数 A、B と推定終局クリープ係数を表 3-15 に示す。

6) 結 果

- 6) - 1. 膨張コンクリートのクリープについて、同一鉄筋比の湿布散水養生での応力導入材令の違いによる終局推定クリープ係数と応力導入材令の関係を図 3-12 に示す。これから、この関係は一つの曲線で近似できることがわかり、初期クリープは拘束によるクリープに外力によるクリープが加わったと仮定するならば、この曲線を縦軸へ外そうした点のクリープ係数が拘束によるクリープ、すなわち膨張途上のクリープ係数を与えと考えられる。
- 6) - 2. 膨張コンクリート (CSA シリーズ)、普通コンクリート (P シリーズ) とともに養生条件の影響を受け、湿布散水養生より気乾養生の方がクリープは大きく、前者に対する影響の大きいが大きい。
- 6) - 3. CSA シリーズでは、みかけのクリープに対しては拘束鉄筋比の顕著な影響はない。
- 6) - 4. みかけの乾燥収縮ひずみは、CSA, P シリーズとも大差はなく、本実験では拘束鉄筋比の影響は顕著ではなかった。
- 6) - 5. 初期クリープの終了後、外力が載荷されたときのクリープは普通コンクリートと大差はない⁵⁾。

3-4-2. 弾性係数

1) 概 要

クリープ係数と同様に、弾性係数についても材令の関数として表示する必要がある。本実験では、型枠拘束供試体と一軸拘束供試体の弾性係数測定を行い、材令の関数として表示することを試みた。

2) 試験方法

型枠拘束供試体は $\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体。一軸拘束供試体は $10 \times 10 \times 380$ cmの角柱供試体で、鋼製端板とP.C鋼棒で一軸拘束とした。一軸拘束供試体では、中空の鋼製円環を用い一軸拘束状態のまま載荷を行った。その略図を図3-13に示す。型枠拘束供試体は所定材令まで型枠中で放置したものである。いずれも散水湿布養生を行った。載荷材令は12, 18時間、1日、7日、14日、28日、90日である。

3) 結 果

試験結果を図3-14、3-15に示す。一軸拘束体にややバラツキが認められるが、型枠拘束体と大差はなく、この関係を材令で近似表示すると次式が得られる。

$$\begin{cases} t \leq 24 \text{ hrs} & \text{単位 } t : \text{hr} \\ E_c = \exp(0.249t + 6.41) & (\%) \end{cases}$$
$$\begin{cases} T \geq 1 \text{ day} & \text{単位 } T : \text{day} \\ E_c = 0.49 \log T + 2.4 & (\times 10^5 \%) \end{cases}$$

3-5. ま と め

本章では圧力トンネルへケミカルプレストレストコンクリートを適用することを前提とし、そのための適正配合の決定を行い、その配合のもとでケミカルプレストレスおよびケミカルプレストレストコンクリートの基本的特性を明らかにするために、はりの載荷試験、クリープ・弾性係数についての考察を行った。得られた結果を以下に述べ本章の結論とする。

- 1) 圧力トンネルに使用される膨張コンクリートが部材として引張強度50%以上を有するためには、拘束鉄筋比約1%の一軸拘束供試体で発現する

拘束膨張ひずみが $1,000 \times 10^{-6}$ 程度必要であり、かつ膨張によるコンクリート組織の破壊がなされないことを考慮した結果、単位セメント量 360 kg/m^3 、単位膨張材量 60 kg/m^3 の配合が本実験からは最適であるといえる。

- 2) 膨張コンクリートによって導入されるケミカルプレストレスは、はり載荷試験から、拘束鉄筋比と鉄筋弾性係数ならびに打設時からの拘束膨張ひずみの積でその値が計算され、かつその値は機械的に導入したプレストレスとほぼ同じであることが確認された。また、ケミカルプレストレスによってコンクリート組織に影響を与えていても力学的な性状に影響は与えないと考えられる。
- 3) ケミカルプレストレストコンクリートのクリープについては、膨張が発現過程（一般に材令 14 日程度まで）と膨張が平衡状態になった後とで分けて考えるべきで、特に膨張発現過程におけるケミカルプレストレスによるクリープについて評価・定量化を行い、クリープ係数を材令の関数として表示した。膨張が平衡状態になった後の外力に対するクリープ特性は、普通コンクリートと大差はないものと推定される。
- 4) 弾性係数については、型枠拘束供試体と一軸拘束供試体について測定を行い、両者の弾性係数には多少バラツキはあるが顕著な差は認められず、材令の関数として表示できた。

第 3 章 参考文献

1) 膨張コンクリート設計施工指針(案)

コンクリート・ライブラリー第45号、昭和54年11月

2) 国分、小林、長滝、岡村、町田；膨張性セメント混和材を用いたコンクリートの標準試験方法に関する研究、膨張性セメント混和材を用いたコンクリートに関するシンポジウム、コンクリート・ライブラリー第39号、1974

3) 辻；ケミカルプレストレスの推定方法について、セメント技術年報、1973

4) 岡村、池内；膨張コンクリートを用いた曲げ部材におけるクリープの影響、セメント技術年報、1977

5) 陳；膨張セメントコンクリートのプレストレスおよびクリープに関する研究、京都大学工学研究科修士論文、昭和46年3月

表3-1 セメントの物理化学性質

物理試験

	比重	粉末度		凝				安定性
		比表面積 (cm^2/g)	2.3 μ ふるい 残分 (%)	水量 (%)	室内温度 ($^{\circ}\text{C}$)	室内温度 (%)	結 晶 始 (min) 終 (h-m)	
デンカセメント	3.16	3,200	1.5	26.6	20.1	90	146 3-27	良
日本工業規格		2,500以上			20 \pm 3	80以上	60以上 10以下	良

	フロー値	曲げ強さ (kgf/ cm^2)			圧縮強さ (kgf/ cm^2)			養生水の温度 ($^{\circ}\text{C}$)		
		1日	3日	7日	1日	3日	7日	1日	3日	7日
デンカセメント	256	-	33	51	-	148	250	-	20.1	20.1
日本工業規格						70以上	150以上	20 \pm 2	20 \pm 2	20 \pm 2

化学成分 (%)

	強熱減量 ig. loss	不溶残分 insol.	二酸化けい素 SiO_2	酸化アルミニウム Al_2O_3	酸化鉄 Fe_2O_3	酸化カルシウム CaO	酸化マグネシウム MgO	三酸化 いおう SO_3	計	水硬率 H.M
デンカセメント	0.6	0.1	22.1	5.1	3.1	64.6	1.1	1.9	98.6	2.09
日本工業規格	3.0以下						5.0以下	3.0以下		

表 3-2 膨張材（デンカ CSA）試験成績表

1. 化学成分

項 目	酸化マグネシウム	強 熱 減 量
日本工業規格	5.0 % 以下	3.0 % 以下
試 験 結 果	1.3	0.7

注) 測定方法は JIS R 5202 による。

2. 物理的性質

項 目		日本工業規格	試 験 結 果
比 重	¹⁾		2.96
比 表 面 積	cm ² /g ²⁾	2,000 以上	2,440
1.2mm ふるい残分	% ³⁾	0.5 以下	0
凝 結	⁴⁾ 始 発 min	60 以後	2-14
	終 結 h	10 以内	3-15
膨 張 性 (長さ変化率)	⁵⁾ 7 日	0.00030 以上	0.00078
	28 日	-0.00020 以上	0.00048
圧 縮 強 さ kgf/cm ²	⁶⁾ 3 日	70 以上	153
	7 日	150 以上	220
	28 日	300 以上	331

注)

- ¹⁾ }
²⁾ } JIS R 5201 による。
⁴⁾ }
³⁾ }
⁵⁾ } JIS A 6202 による。
⁶⁾ }

表3-3 壓縮強度，膨張測定試驗結果

	Gmax (mm)	w/c (%)	c (kg/m ³)	csA (kg/m ²)	s/a (%)	sl (cm)	air (%)	材令 養生	長 さ 変 化 率 (×10 ⁻⁴)												1 年	2 年
									1 日	2 日	4 日	7 日	14 日	21 日	23 日	55 日	91 日					
膨 張 率 試 験	25	55	300	0	41	9.4	3.7	水 中	0.14	0.18	0.16	0.30	0.32	0.29	0.31	—	-0.16	-0.19	-0.20			
	"	"	"	50	"	9.6	3.6	湿 布	0.13	0.21	0.18	0.35	0.48	-1.04	-1.49	-1.69	-3.71	-3.88	-3.97			
	"	"	"	60	"	14.6	4.5	水 中	1.51	4.45	8.38	10.10	10.47	10.06	10.08	—	9.53	10.06	10.53			
	"	"	"	70	"	15.2	3.6	湿 布	1.55	3.94	7.04	7.77	8.16	6.12	5.55	5.36	3.22	1.45	0.30			
	"	"	"	840	48	8.6	3.3	水 中	2.22	5.87	10.53	14.32	15.05	15.77	15.90	—	15.04	15.14	15.10			
	"	"	"	60	"	7.5	3.0	湿 布	2.25	6.58	11.58	15.36	15.75	13.78	12.97	12.23	10.23	8.64	7.50			
	"	"	"	70	"	11.8	3.6	水 中	2.23	7.42	13.22	17.29	20.87	22.23	22.31	—	21.23	21.06	21.23			
	"	"	"	840	48	8.6	3.3	湿 布	3.03	8.90	14.97	19.31	22.49	20.03	18.88	17.86	15.06	13.10	11.05			
	"	"	48	340	0	40	8.6	3.3	水 中	0.12	0.14	0.27	0.38	0.48	0.40	0.39	—	-0.10	0	-0.05		
	"	"	"	50	"	7.5	3.0	湿 布	0.40	0.48	0.48	0.64	0.73	-0.55	-0.95	-1.19	-2.79	-3.06	-3.43			
	"	"	"	60	"	11.8	3.7	水 中	1.25	4.27	7.91	9.13	9.30	9.26	9.26	—	8.74	8.38	8.53			
	"	"	"	70	"	11.7	3.7	湿 布	1.51	3.35	5.95	6.71	7.19	5.01	4.39	4.21	2.09	0.33	-1.83			
圧 縮 強 度 試 験	"	"	"	60	"	11.8	3.7	水 中	2.00	5.77	10.92	14.91	15.79	15.96	16.53	16.78	—	15.88	16.44	16.53		
	"	"	"	70	"	11.7	3.7	湿 布	2.27	6.32	11.58	15.57	15.96	13.86	12.97	12.25	10.32	8.85	7.33			
	"	"	"	840	48	8.6	3.3	水 中	2.26	7.40	13.71	18.43	22.17	23.39	23.53	—	22.56	22.66	22.60			
	"	"	"	60	"	9.8	3.6	湿 布	2.27	7.26	13.62	18.69	21.39	19.00	17.88	16.96	14.55	12.74	10.53			
	"	43	380	0	37	9.8	3.6	水 中	0.15	0.18	0.31	0.40	0.48	0.43	0.42	—	0.03	0.27	0.20			
	"	"	"	50	"	6.4	2.8	湿 布	0.39	0.45	0.45	0.51	0.66	-0.78	-1.27	-1.39	-3.53	-7.18	-9.73			
	"	"	"	60	"	11.1	3.8	水 中	1.12	4.13	6.87	7.60	7.99	8.05	8.08	—	7.75	10.02	9.58			
	"	"	"	70	"	11.1	3.8	湿 布	1.23	3.01	4.58	4.97	5.70	3.53	2.94	2.77	0.73	0.50	0.30			
	"	"	"	840	48	8.6	3.3	水 中	2.39	6.17	11.26	15.00	15.38	16.22	16.47	—	15.69	14.79	15.35			
	"	"	"	60	"	11.1	3.8	湿 布	2.22	5.92	10.13	13.36	13.81	11.57	10.73	9.94	8.03	6.45	4.52			
	"	"	"	70	"	11.1	3.6	水 中	2.45	6.91	13.29	18.26	21.91	23.18	23.38	—	22.62	21.55	22.70			
	"	"	"	840	48	8.6	3.3	湿 布	2.47	6.51	12.65	18.44	20.97	18.51	17.45	16.53	14.12	12.38	10.83			
圧 縮 強 度 試 験								養 生	圧 縮 強 度													
	25	55	300	0	41	16.4	3.8	湿 布	無拘束	—	—	212	255									
	"	48	340	0	40	15.0	4.0		"	—	—	293	324									
	"	43	380	0	37	14.8	3.9		"	—	—	333	393									

表3-4 膨張試験結果

配 合 種 類 (kg/m ³)	S.L. (cm)	AIR (%)	養 生	長 さ 変 化 率 (×10 ⁻⁴)										
				1日	2日	5日	7日	14日	21日	28日	35日	124日	274日	440日
3 4 0 - 6 0 (単位セメント量)(単位CSA量)	14.5	3.6	S	1.61	6.05	12.88	15.36	17.27	14.97	14.09	13.44	11.18	10.44	10.83
			W	1.70	6.58	13.23	15.57	17.65	17.68	17.30	16.45	17.18	16.83	
			S	1.44	5.77	12.88	15.00	16.77	14.29	13.36	12.69	10.42	9.64	9.61
3 6 0 - 6 0	14.9	3.6	W	1.48	5.66	12.64	15.01	16.77	16.85	16.90	16.58	15.79	17.73	17.49
			S	2.51	5.93	15.73	18.95	23.35	20.73	19.49	18.65	15.78	14.91	13.56
3 8 0 - 7 0	14.4	3.4	W	1.34	5.73	14.81	17.82	21.86	22.31	22.44	22.16	21.38	21.95	21.69

S ; 気乾養生 W ; 湿布養生

表3-5 圧縮性状試験結果

配 合 種 類 (kg/m ³)	SL (cm)	AIR (%)	養生条件	養生	圧 縮 強 度 試 験																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
					10h		13h		1日		7日		14日				28日				91日				1年																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
					σ _c		σ _c		σ _c		σ _c	ν	σ _c	Ec	ν	σ _c	Ec	ν	σ _c	Ec	ν	σ _c	Ec	ν																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
3 4 0 - 6 0 (単位セメント量)(単位CSA量)	14.5	3.6	無 拘 束	S																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						

但し σ_c : 圧縮強度 (kg/cm²)

ν : ポアソン比を表わす。

S : 14日湿布以後気乾(20℃、65%RH)

Ec : 弾性係数 (×10⁵ kg/cm²)

W : 湿布養生(20℃)

表 3-6 コンクリート示方配合

GMAX mm	スランプ cm	A I R %	W / C %	S / A %	単 位 量 kg/m ³					
					W	C	S	G	CSA	AE剤
25	14+1	3+1	45	40	162	360	636	1085	60	36

表 3-7 はり供試体試験条件および名称

条 件	はり 名 称
普通コンクリートはり ・第1文字P：普通コンクリート使用を示す。 ・第2文字：養生条件を示す。 ・第3数字：材令(日)を示す。 ただし、Y：年	P-W-14 NQ 1
	NQ 2
	P-W-28 NQ 1
	NQ 2
	P-S-28 NQ 1
	NQ 2
	P-W-91 NQ 1
	NQ 2
	P-S-I Y NQ 1
	NQ 2
ケミカルプレストレストコンクリートはり ・CSA：膨張コンクリート使用を示す。 ・第2文字：養生条件を示す。 ・第3数字：材令(日)を示す。 ただし Y：年	CSA-W-14 NQ 1
	NQ 2
	CSA-W-28 NQ 1
	NQ 2
	CSA-S-28 NQ 1
	NQ 2
	CSA-W-91 NQ 1
	NQ 2
	CSA-S-I Y NQ 1
	NQ 2
機械的にプレストレスを与えたはり ・P-PC：普通コンクリート使用プレストレスを与えたこと示す。 ・数字：鉄筋に与えたひずみ	CSA-W-I Y NQ 1
	NQ 2
	P-PC-500
	P-PC-600
	P-PC-700
	P-PC-800

W；湿布養生

S；気乾養生

表3-8 はり供試体コンクリート示方配合

供 試 体	G M A X mm	スランブ cm	A I R %	W/C %	S/A %	単 位 量 kg/m ³					
						W	C	S	G	CSA	AE 剤
普通コンクリートはり (記号P-PC)	25	14+1	3+1	45	40	162	360	696	1085	0	36
ケミカルプレストレスト コンクリートはり (記号CSA)								636		60	

表3-9 はり供試体コンクリートの諸強度および定数

は り 名 称	σ_c (kg/cm ²)	σ_b (kg/cm ²)	σ_t (kg/cm ²)	E_c ($\times 10^5$ kg/cm ²)	ν	n
P-W-14 №1 №2	297	38.7	24.2	2.41	0.168	8.71
CSA-W-14 №1 №2	405	48.4	33.1	2.70	0.184	7.78
P-W-28 №1 №2	371	52.6	31.0	2.70	0.188	7.78
CSA-W-28 №1 №2	421	52.2	38.4	2.69	0.211	7.80
P-S-28 №1 №2	323	48.5	29.2	2.39	0.157	8.79
CSA-S-28 №1 №2	429	53.1	37.7	2.69	0.205	7.80
P-W-91 №1 №2	434	61.6	37.5	2.82	0.200	7.45
CSA-W-91 №1 №2	488	69.8	41.2	2.90	0.200	7.24
P-S-1Y №1 №2	425	57.6	36.9	2.86	0.197	7.34
CSA-S-1Y №1 №2	521	65.4	50.7	3.15	0.183	6.67
P-W-1Y №1 №2	459	63.6	39.8	2.87	0.189	7.32
CSA-W-1Y №1 №2	526	72.2	46.1	3.23	0.179	6.50
P-PC-500	360	47.3	29.8	2.40	0.177	8.75
P-PC-600						
P-PC-700						
P-PC-800	372	50.3	33.2	2.50	0.180	8.45

σ_c : コンクリート圧縮強度、 σ_b : コンクリート曲げ強度、 σ_t : コンクリート引張強度

E_c : コンクリート弾性係数、 ν : ポアソン比、

n : 弾性係数比

但し、すべてはり供試体載荷材令での測定値

表 3-10 はり供試体最終耐力およびひびわれ発生荷重

は り 名 称		最終耐力: $P_{max}(t)$	ひびわれ発生荷重: $P_{cr}(t)$
P-W-14	No. 1	10.3	2.97
	No. 2	10.65	2.99
P-W-28	No. 1	10.9	3.46
	No. 2	10.9	3.23
P-S-28	No. 1	10.3	3.00
	No. 2	11.3	2.76
P-W-91	No. 1	11.2	3.83
	No. 2	11.6	3.75
P-S-1Y	No. 1	11.49	3.50
	No. 2	11.29	3.34
P-W-1Y	No. 1	11.69	4.01
	No. 2	11.62	3.80
CSA-W-14	No. 1	11.0	5.03
	No. 2	10.75	5.03
CSA-W-28	No. 1	11.2	4.96
	No. 2	11.65	4.80
CSA-S-28	No. 1	11.65	4.23
	No. 2	12.1	4.16
CSA-W-91	No. 1	12.7	6.15
	No. 2	11.9	5.17
CSA-S-1Y	No. 1	12.62	4.35
	No. 2	13.15	4.14
CSA-W-1Y	No. 1	12.25	5.41
	No. 2	12.85	5.15
P-PC-500		11.3	5.19
P-PC-600		11.25	5.22
P-PC-700		11.3	5.66
P-PC-800		11.2	5.63

表3-11 ケミカルプレストレス計算結果

はり名称	ε_{se} ($\times 10^{-4}$)	σ_{cp} (kg/cm^2)	P_e (t)	σ_{cpe} (kg/cm^2)	P_{cr} (t)	σ_{cr} (kg/cm^2)	W (kg)	I_e (cm^4)	$\frac{\sigma_{cp}}{\sigma_{cpe}}$
P-W-14	No.1	—	—	—	2.97	40.5	690	79410	—
					3.00	40.8	690		
CSA-W-14	No.1	715	22.8	1.29	5.03	65.9	690	78138	1.14
	No.2			1.23	5.03	65.9	690		
P-W-28	No.1	—	—	—	3.46	47.0	660	79519	—
	No.2				3.23	44.2	660		
CSA-W-28	No.1	752	24.0	1.08	4.96	64.9	680	78179	1.25
	No.2			1.21	4.80	63.0	680		
P-S-28	No.1	—	—	—	3.00	40.6	680	78138	—
	No.2				2.76	37.8	680		
CSA-S-28	No.1	560	17.9	0.96	4.23	56.2	680	78179	1.12
	No.2			0.80	4.16	55.4	680		
P-W-91	No.1	—	—	—	3.83	51.9	700	77687	—
	No.2				3.75	50.8	690		
CSA-W-91	No.1	825	26.3	1.48	6.15	80.2	700	77400	1.18
	No.2			1.28	5.17	68.1	680		
P-S-1Y	No.1	—	—	—	3.50	47.81	690	77534	—
	No.2				3.34	45.97	690		
CSA-S-1Y	No.1	562	17.9	0.78	4.35	58.96	700	76618	1.20
	No.2			0.72	4.14	56.37	700		
P-W-1Y	No.1	—	—	—	4.01	54.06	690	77506	—
	No.2				3.80	51.55	690		
CSA-W-1Y	No.1	860	27.3	1.59	5.41	72.09	700	76386	1.15
	No.2			1.35	5.15	68.89	700		
P-PC-500		525	17.2	1.06	5.19	66.6	680	79465	0.96
P-PC-600		630	20.7	1.31	5.22	67.1	700		0.99
P-PC-700		701	22.4	1.45	5.66	72.7	700	78986	0.98
P-PC-800		793	25.3	1.73	5.63	72.3	690		0.97

ε_{se} : 鉄筋膨張ひずみ、P-PCシリーズでは鉄筋膨張ひずみ。 σ_{cp} : (3-1)式によるケミカルプレストレス

P_e : 全断面有効区間の上限荷重。 σ_{cpe} : (3-2)式によるケミカルプレストレス

P_{cr} : ひびわれ発生荷重。 σ_{cr} : ひびわれ発生応力。 W : はり自重。

I_e : 換算断面2次モーメント。

表 3-12 ひびわれ発生応力とケミカルプレストレス

は り 名 称		$\sigma_{cr.CSA}$ (Kg/cm ²)	$\sigma_{cr.P}$ (Kg/cm ²)	σ_{cp} (Kg/cm ²)	$\sigma_{cr.P} + \sigma_{cp}$ (kg/cm ²)	$\frac{\sigma_{cr.CSA}}{\sigma_{cr.P} + \sigma_{cp}}$
CSA-W-14	№ 1	65.9	40.7	22.8	63.5	1.04
	№ 2	65.9				1.04
CSA-W-28	№ 1	64.9	45.6	24.0	69.6	0.93
	№ 2	63.0				0.91
CSA-S-28	№ 1	56.2	39.2	17.9	57.1	0.98
	№ 2	55.4				0.97
CSA-W-91	№ 1	80.2	51.4	26.3	77.7	1.03
	№ 2	68.1				0.88
CSA-S-1Y	№ 1	59.0	46.9	17.9	64.8	0.91
	№ 2	56.4				0.87
CSA-W-1Y	№ 1	72.1	52.8	27.3	80.1	0.90
	№ 2	68.9				0.86
P-PC-500		66.6	※ 47.3	17.2	64.5	1.03
P-PC-600		67.1		20.7	68.0	0.99
P-PC-700		72.7		22.4	69.7	1.04
P-PC-800		72.3		25.3	72.6	1.01

$\sigma_{cr.CSA}$: CSAシリーズはりのひびわれ発生応力

$\sigma_{cr.P}$: Pシリーズはりのひびわれ発生応力

σ_{cp} : ケミカルプレストレス(膨張ひずみより求めたもの)

※ 無応力供試体のひびわれ応力実測値

表 3-13 外力クリープ試験供試体

	供試体種類	拘束鉄筋	発生条件	
			14日	28日
応力導入供試体	CSA-23-14 W	23	○	○
	CSA-23-28 W	"		
	CSA-17-14 W	17-23	○	
	CSA-17-28 W	"		○
	CSA-23-14 S	23	○	
	CSA-23-28 S	"		○
	CSA-17-14 S	17-23	○	
	CSA-17-28 S	"		○
	P-23-14 W	23	○	
	P-23-28 W	"		○
	P-23-14 S	"	○	
	P-23-28 S	"		○
コントロール供試体	CSA-23-D W	"		
	CSA-17-D W	17		
	CSA-23-14 DS	23		
	CSA-23-28 DS	"		
	CSA-17-14 DS	17		
	CSA-17-28 DS	"		
	CSA-17C-14 DS	17-23	×	
	CSA-17C-28 DS	"		×
	CSA-17C-14 DW	"	×	
	CSA-17C-28 DW	"		×
	P-23-D W	23		
	P-23-14 DS	"		
	P-23-28 DS	"		

— : 湿布, --- : 気乾, ○ : 導入
(20°C) (20°C, 65%RH)

CSA 23 14 W
コンクリート種類 拘束鉄筋種類 導入材令 発生条件

なお、Dはダミーの略であり、Cは17mmから、23mmへ変換した試験体である

表 3-14

クリープ試験供試体応力導入時の弾性ひずみ

導入材令 (日)	コンクリート種類	使用PC鋼筋	発生条件	
			湿布	湿布→ 導入後気乾
14	360-60	Ø17-Ø23	360×10^{-6}	385×10^{-6}
		Ø23	335 "	375 "
	360-0	Ø23	426 "	450 "
28	360-60	Ø17-Ø23	330 "	365 "
		Ø23	328 "	360 "
	360-0	Ø23	355 "	350 "

表 3-15 クリープ試験結果

$$\epsilon_c = \frac{t}{A+Bt}$$

供試体種類	実験定数		推定終局 クリープ係数
	A	B	
CSA-23-14 W	4.14	0.86	1.16
CSA-23-28 W	5.99	0.94	1.06
CSA-17-14 W	2.88	0.74	1.35
CSA-17-28 W	8.87	0.96	1.04
CSA-23-14 S	4.75	0.59	1.69
CSA-23-28 S	15.8	0.63	1.59
CSA-17-14 S	5.27	0.64	1.56
CSA-17-28 S	8.36	0.67	1.49
P-23-14 W	20.4	1.03	0.97
P-23-28 W	21.6	1.03	0.97
P-23-14 S	9.85	0.78	1.28
P-23-28 S	10.3	0.75	1.33

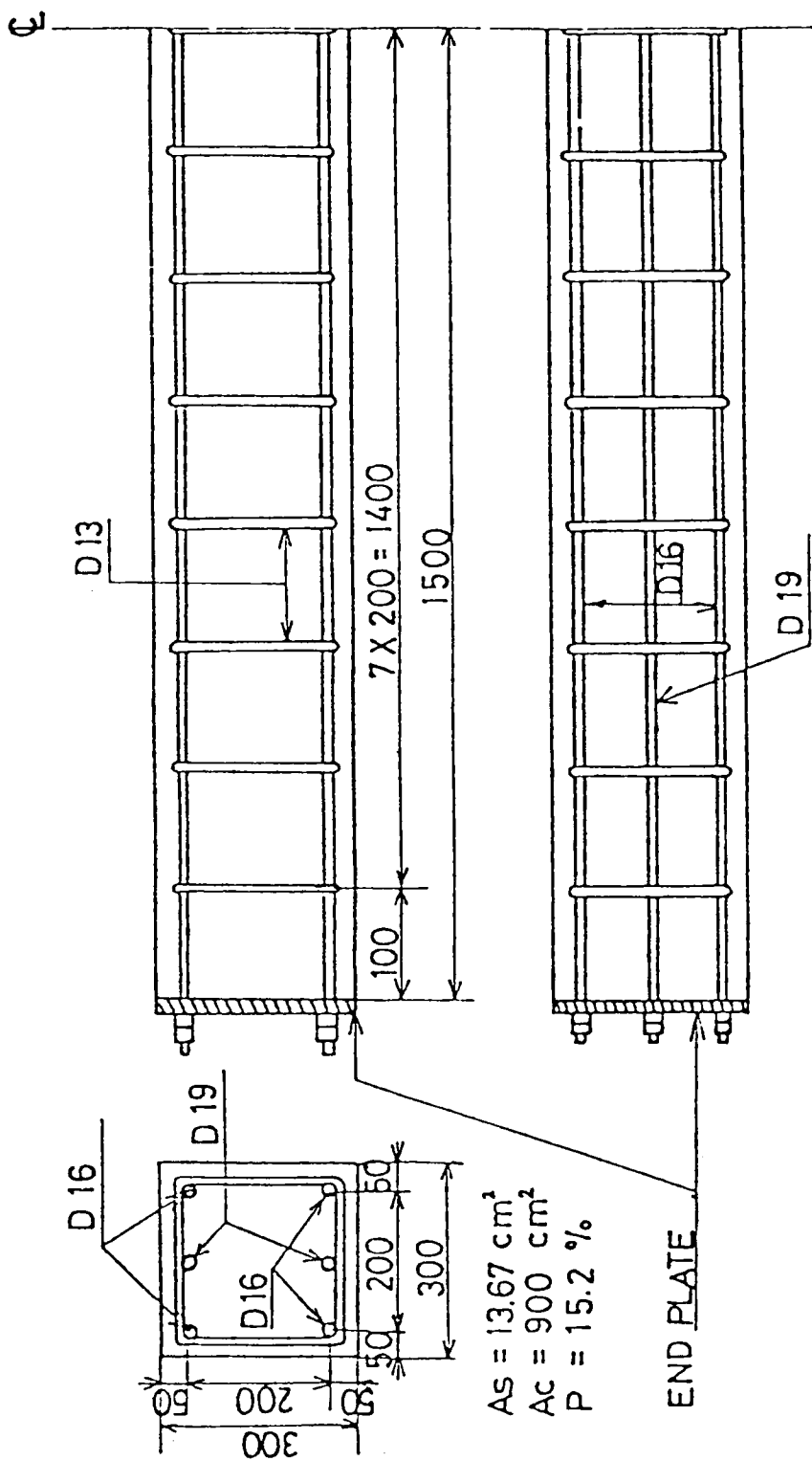


図3-1 はり供試体配筋図(mm)

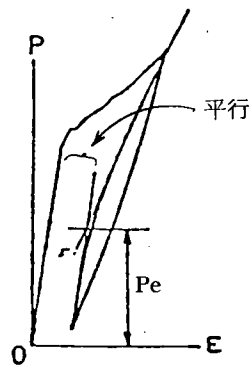


図 3-2 全断面有効上限荷重 (P_e)

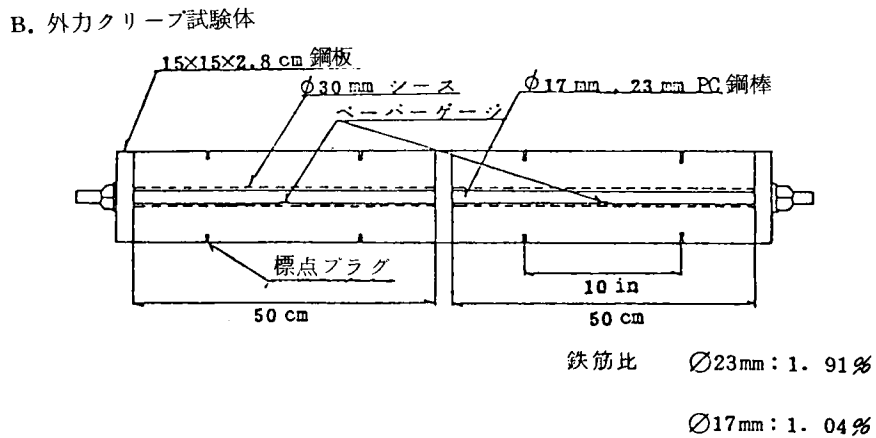
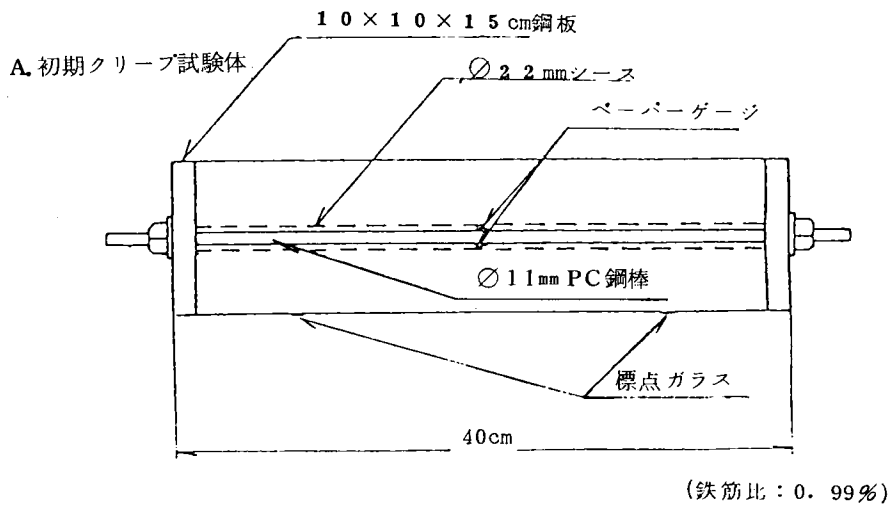


図 3-3 クリープ試験供試体略図

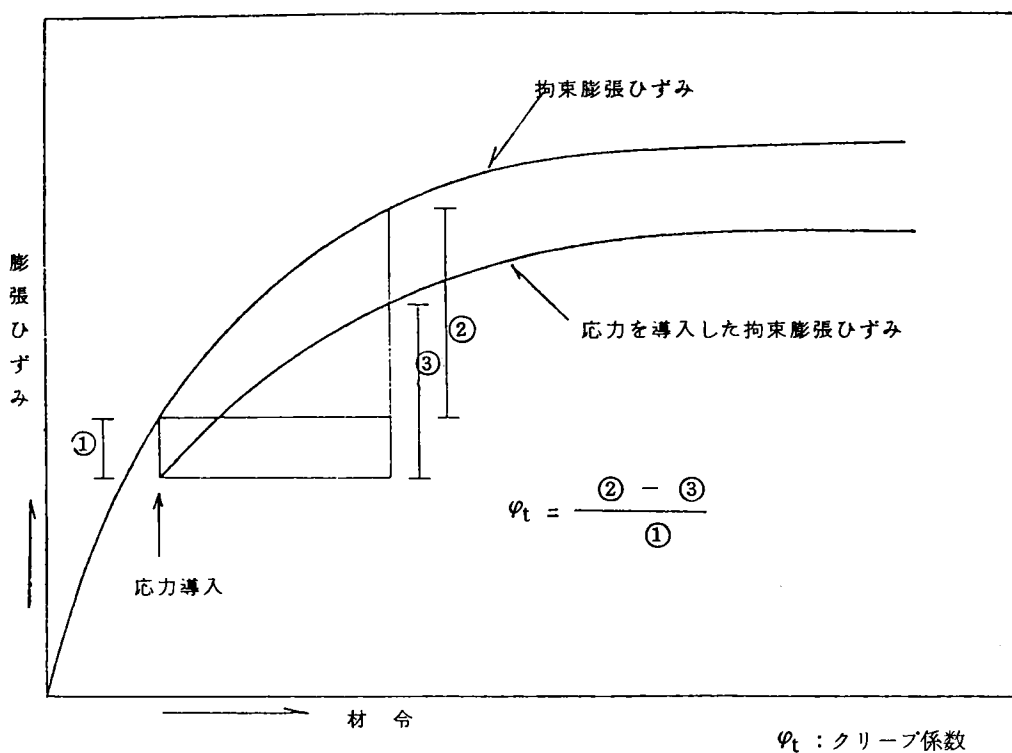


図3-4 材令～膨張ひずみ

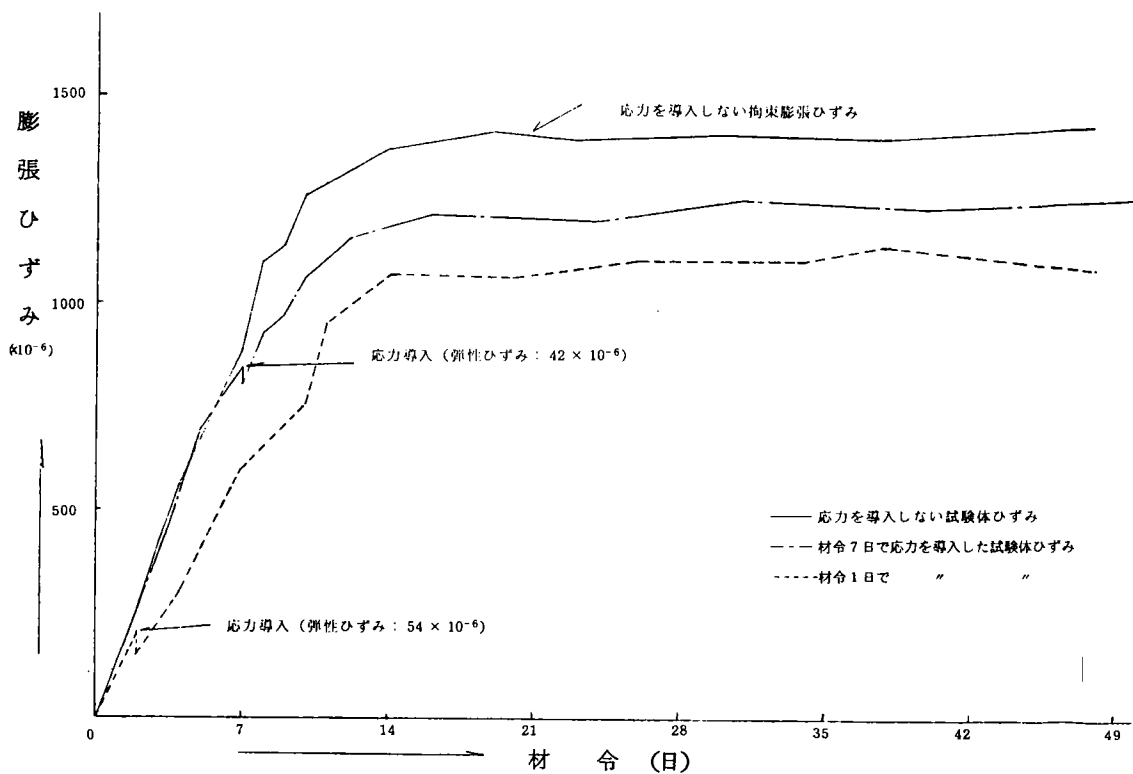


図3-5 膨張ひずみ～材令

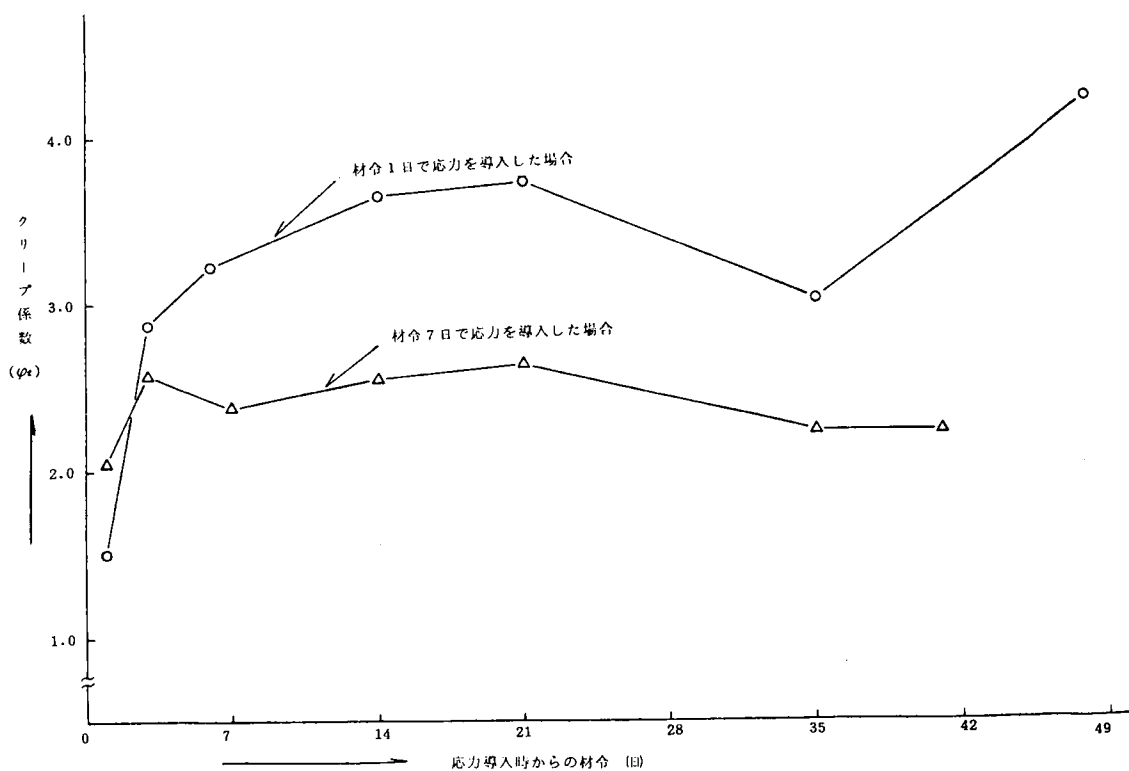


図3-6 クリープ係数～応力導入時からの材令

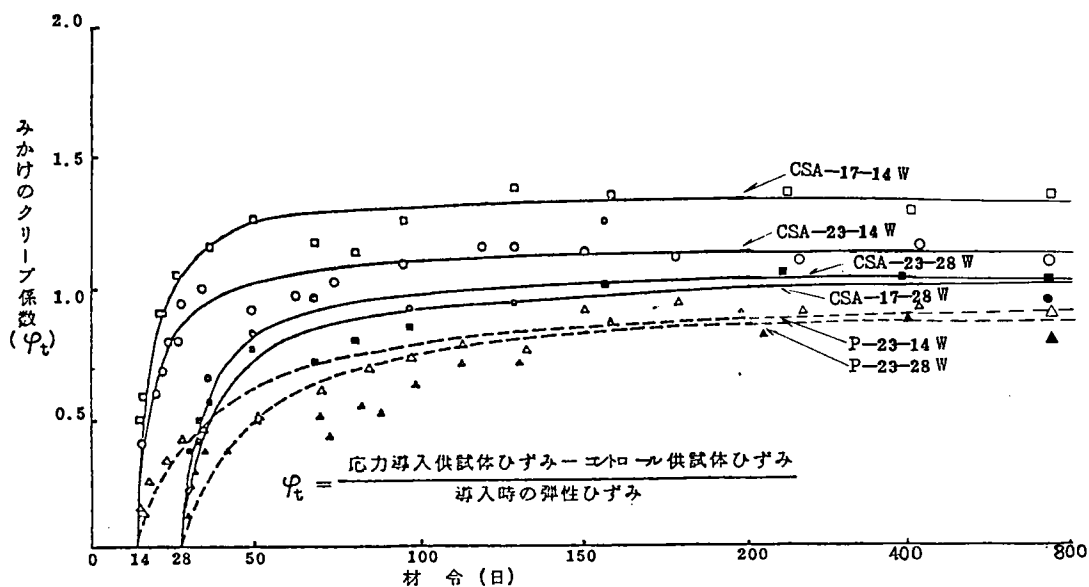


図3-7 みかけのクリープ係数～材令（湿布養生）

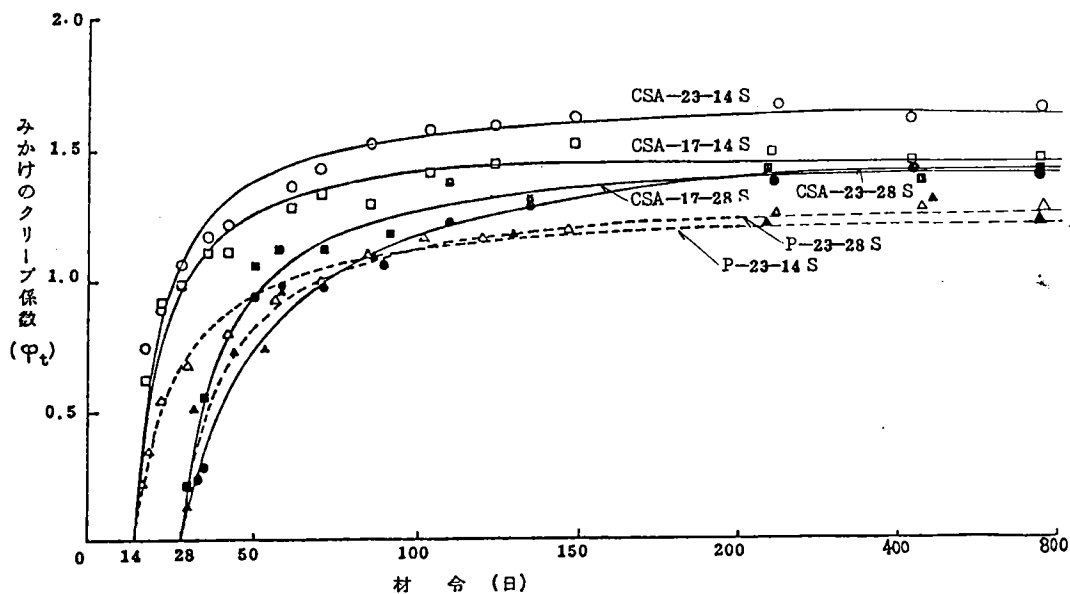


図3-8 みかけのクリープ係数～材令（気乾養生）

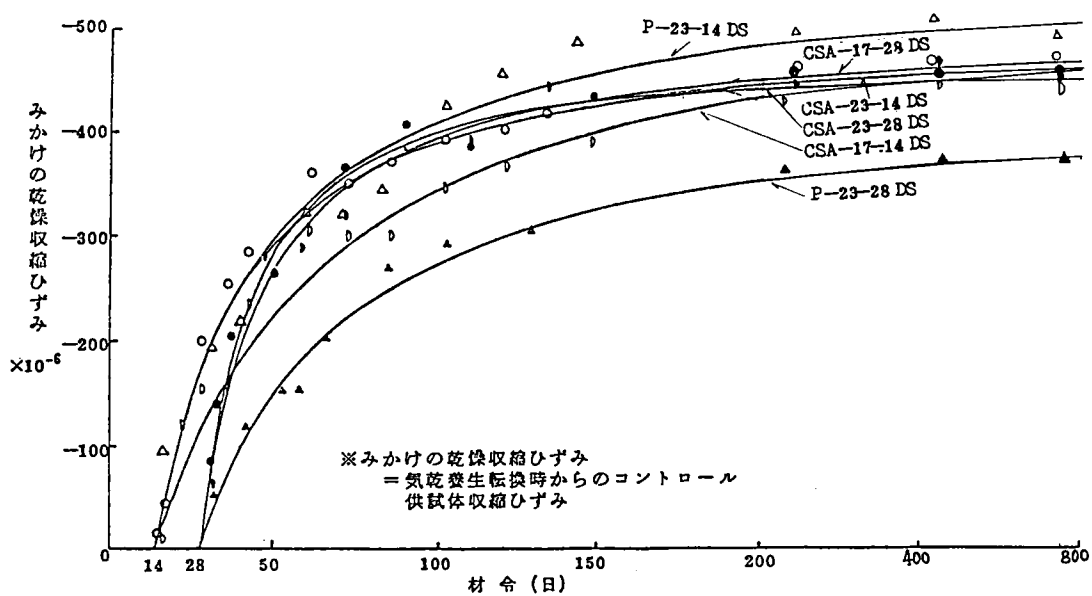


図3-9 みかけの乾燥収縮ひずみ～材令

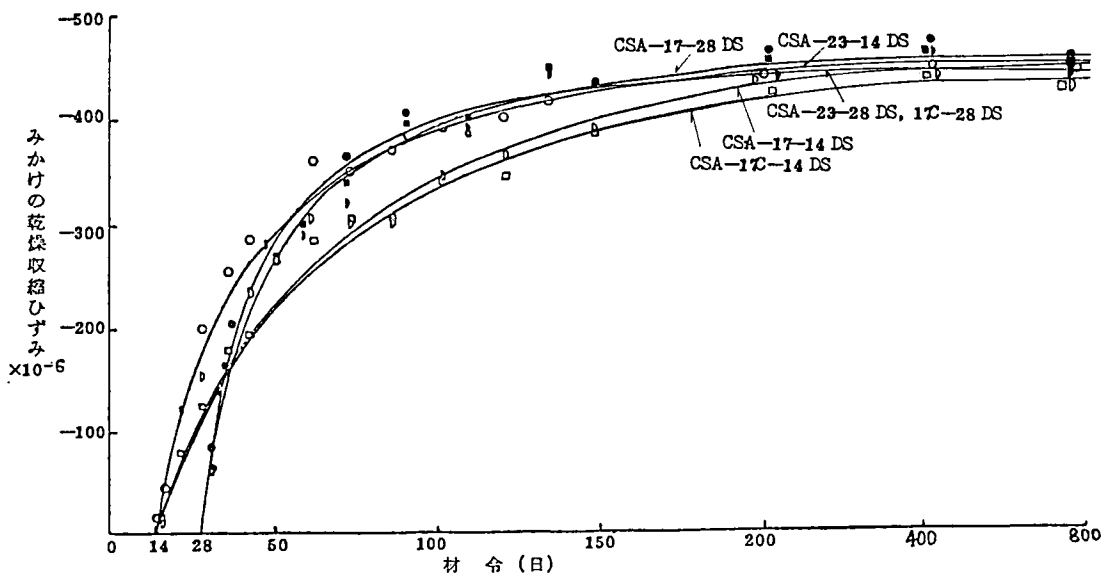


図 3-10 みかけの乾燥収縮ひずみ～材令

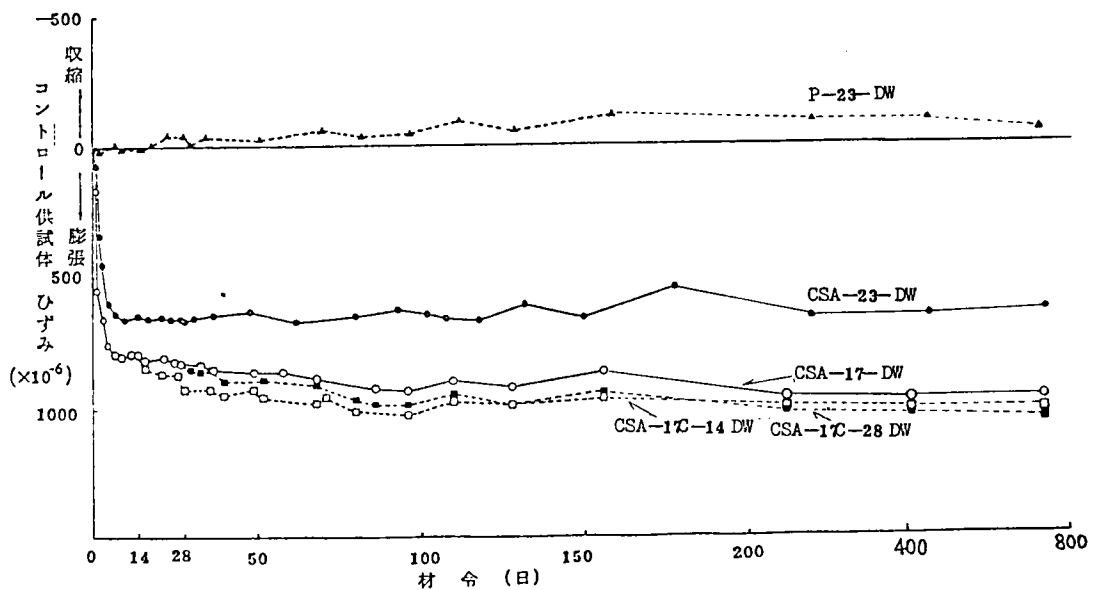


図 3-11 コントロール供試体ひずみ(湿布養生)～材令

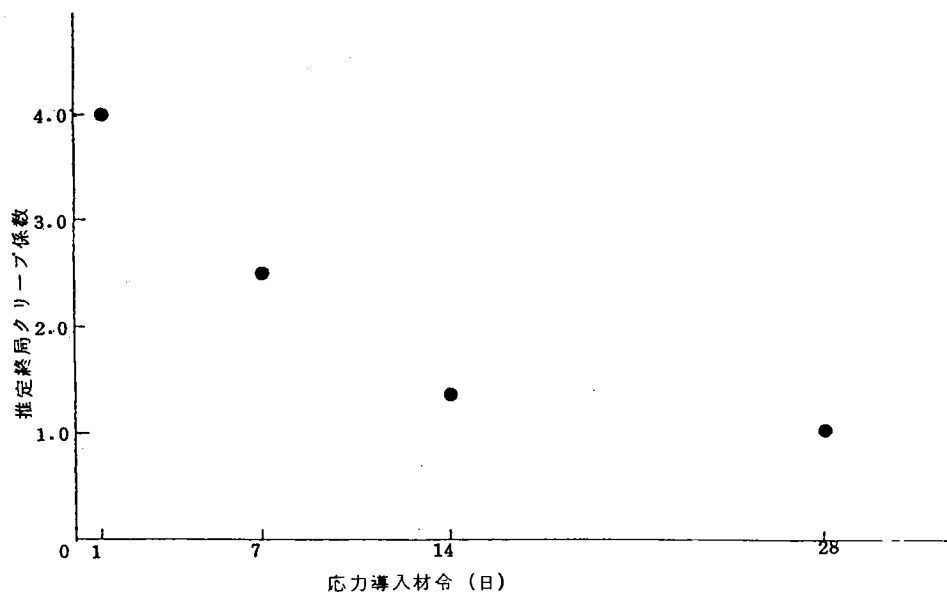


図3-12 推定終局クリープ係数～応力導入材令

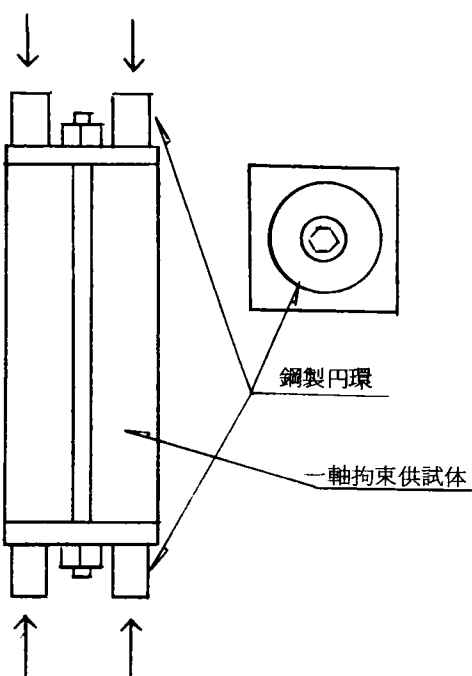


図3-13 一軸拘束供試体弾性係数測定法

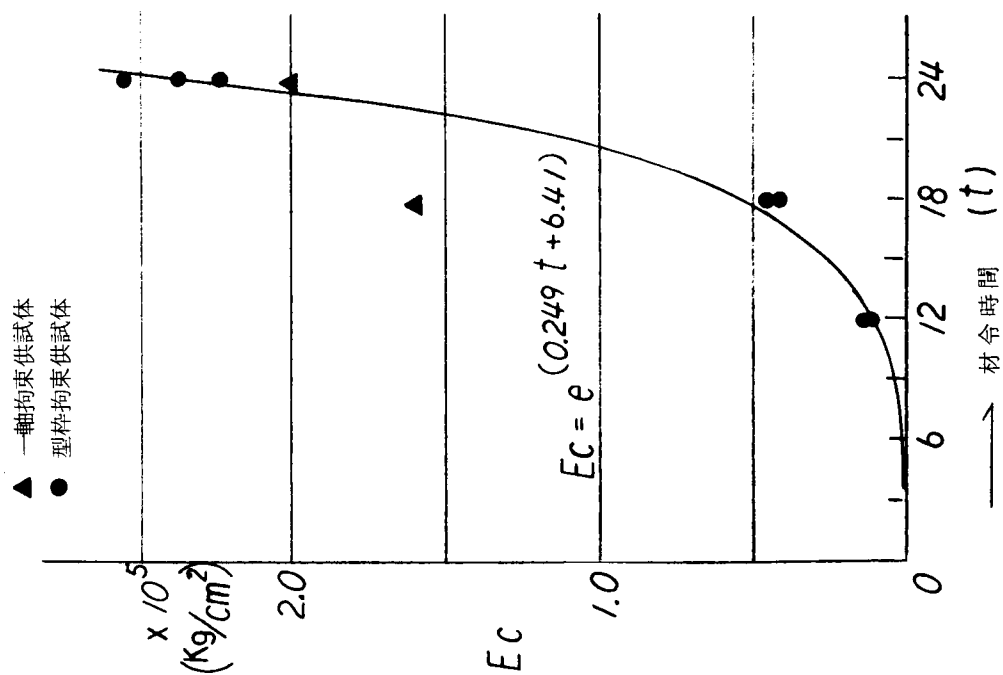


図3-14 弾性係数～材令（材令1日まで）

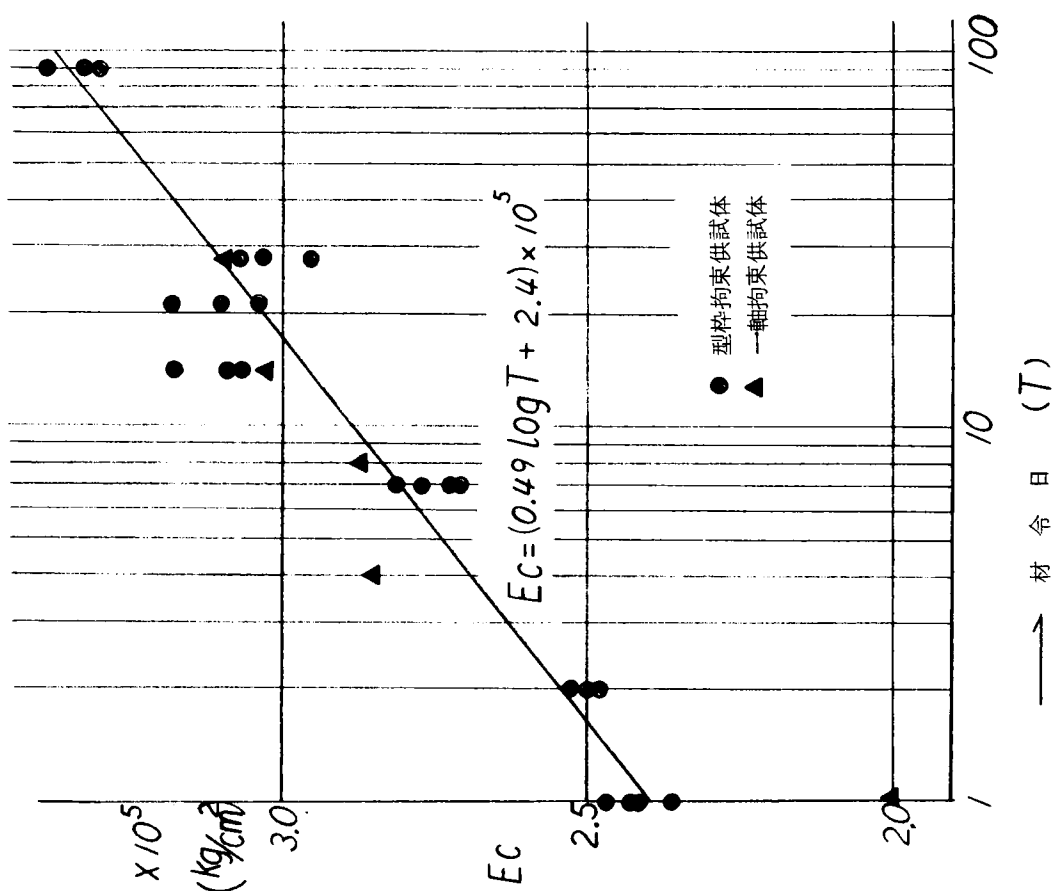


図3-15 弾性係数～材令（材令1日以降）

第 4 章 一軸拘束下でのケミカルプレストレスの評価に関する研究

4-1. ま え が き

膨張コンクリートを有効に利用することによって鉄筋コンクリート構造部材にプレストレスを導入することができる。このケミカルプレストレスの作用は機械的に導入されたプレストレスと大差なく、そのプレストレス量は $(\text{鉄筋膨張ひずみ}) \times (\text{鉄筋弾性係数}) \times (\text{鉄筋比})$ で算定されることは第 3 章で明らかにした。しかしながら、このケミカルプレストレスを期待して鉄筋コンクリート部材の設計を行うためには、拘束膨張ひずみの予測が絶対に必要である。この点について過去にいくつかの方法が報告されてはいるが、必ずしも一般性があるとはいえないのが現状である。^{1) 2) 3)}

本章では、一軸拘束下の拘束膨張ひずみの予測法に関して、プレテンション方式プレストレストコンクリートにおけるプレストレスの経時変化に対する概念を応用し拘束膨張ひずみは無拘束膨張ひずみから次のものを差引いたもの、すなわち発生しているケミカルプレストレスに対応した弾性ひずみとクリープひずみとを引いたものに等しいという仮定のもとに理論式を提案し、弾性係数、クリープ係数の実験値（第 3 章参考）を用いて、材令 14 日までの実測拘束膨張ひずみと提案式による拘束膨張ひずみの計算値との比較検討を行う。ただし、式中出现くる無拘束膨張ひずみについては理論との存在値で実際には実測することができない。むしろ膨張能力と称する方が相応しい。

膨張能力は鉄筋比に拘らず配合によって定まる一定値と仮定し、ある代表的な鉄筋比を有する供試体の実測膨張ひずみ値から提案式を用いて膨張能力を逆算する。他の鉄筋比を有する任意の供試体（配合は一定）に対してもこの逆算膨張能力値を適用して、提案式により一軸拘束膨張ひずみを算定、予測できるものとした。

4-2. 拘束膨張ひずみの予測方法および計算方法

1) 拘束膨張ひずみの予測方法

一軸拘束下での拘束膨張ひずみの予測計算にあたってはプレテンションの概念を導入し、以下の仮定を設けた。

- ① (拘束膨張ひずみ) = (膨張能力) - (ケミカルプレストレスによる弾性ひずみ) - (膨張クリープひずみ)
- ② 微小時間 Δt 間に生ずる膨張クリープひずみは、応力が時間的に変化する場合のクリープひずみの計算式(土木学会プレストレストコンクリート標準示様書)によって計算される。

この2つの仮定のもとで図(4-1)に示すように差分法によって拘束膨張ひずみを計算した。図4-1において

$\epsilon_{ot i}$: t_i 時の膨張能力(無拘束膨張ひずみ)

$\epsilon_{et i}$: t_i 時の弾性変形終了後の残留ひずみ

$\epsilon_{\phi t i}$: t_i 時から Δt 間の膨張クリープひずみ

$\epsilon_{Rt i}$: t_i 時の拘束膨張ひずみ

また、 t_i 時の弾性ひずみ $\epsilon_{et i}$ は $(\epsilon_{ot i} - \epsilon_{ot i-1})$ に起因し、クリープひずみは t_{i-1} までの応力履歴を考慮し、 $(\epsilon_{ot i} - \epsilon_{ot i-1} + \epsilon_{Rt i-1})$ に起因すると考えた。計算にあたっては Δt を1時間として計算した。

2) 計 算 式

a. 弾性変形終了後のひずみ : $\epsilon_{et i}$

$$\begin{aligned}\epsilon_{et i} &= \epsilon_{ot i} - \frac{\epsilon_{et i} \cdot A_s \cdot E_s}{A_c \cdot E_{ct i}} \\ &= \epsilon_{ot i} - n_{t i} \cdot p \cdot \epsilon_{et i} \\ \therefore \epsilon_{et i} &= \frac{1}{1 + n_{t i} \cdot p} \cdot \epsilon_{ot i} \quad \dots\dots\dots (4-1)\end{aligned}$$

ここで、

A_s : 拘束鉄筋断面積

E_s : 拘束鉄筋弾性係数

E_{cti} : t_i 時のコンクリートの弾性係数

p : A_s/A_c

n_{ti} : E_s/E_{cti}

b. クリープひずみ : $\varepsilon_{\varphi ti}$

一般に P C 部材においてプレストレス力 P が ΔP だけ減少するとき次式が成立する。⁴⁾

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\varepsilon_{cpt} \cdot \varphi_t}{\varepsilon_{pt} + \varepsilon_{CPI} \left(1 + \frac{\varphi_t}{2}\right)} \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

ここで、

ε_{cpt} : コンクリートの弾性ひずみ

ε_{pt} : プレストレス導入直後の鋼材ひずみ

φ_t : クリープ係数

これらを次のように一軸拘束下の膨張コンクリートに対応させる。

$$P = \varepsilon_{ot} \cdot A_s \cdot E_s$$

$$\Delta P = \varepsilon_{\varphi t} \cdot A_s \cdot E_s$$

$$\varepsilon_{pt} = \varepsilon_{et}$$

ここで、

ε_{ot} : t 時における膨張能力

$\varepsilon_{\varphi t}$: t 時から Δt の間に生ずるクリープひずみ

ε_{et} : t 時の弾性変形終了後の残留ひずみ

よって

$$\varepsilon_{cpt} = \varepsilon_{ot} - \varepsilon_{et} = \varepsilon_{et} \cdot n_t \cdot p$$

この P , ΔP , ε_{pt} , ε_{cpt} を (4-2) 式に代入し変形すると次式を得る。

$$\varepsilon_{\varphi t} = \frac{n_t \cdot p \cdot \varphi_t}{1 + n_t \cdot p \cdot \left(1 + \frac{\varphi_t}{2}\right)} \cdot \varepsilon_{ot} \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

c. 拘束膨張ひずみ : ε_{Rti}

以上の (4-1)、(4-2)、(4-3) 式を用いて Δt の時間間隔で

ε_{Rti} を逐時計算する。

○ t_1 時

$$\bullet \varepsilon_{et1} = \frac{1}{1 + n_{t1} \cdot p} \cdot \varepsilon_{ot1}$$

$$\bullet \varepsilon_{\varphi t1} = \frac{n_{t1} \cdot p \cdot \varphi_{t1}}{1 + n_{t1} \cdot p \cdot (1 + \frac{\varphi_t}{2})} \cdot \varepsilon_{ot1}$$

$$\begin{aligned} \therefore \varepsilon_{Rt1} &= \varepsilon_{ot1} - \varepsilon_{\varphi t1} \\ &= (A_{t1} - B_{t1}) \cdot \varepsilon_{ot1} \dots\dots\dots (4-4) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} A_{ti} &= \frac{1}{1 + n_{ti} \cdot p} \\ B_{ti} &= \frac{n_{ti} \cdot p \cdot \varphi_{ti}}{1 + n_{ti} \cdot p \cdot (1 + \frac{\varphi_t}{2})} \dots\dots\dots (4-5) \end{aligned}$$

○ t_2 時

$$\begin{aligned} \bullet \varepsilon_{et2} &= (\varepsilon_{ot2} - \varepsilon_{ot1}) - n_{t2} \cdot p \cdot \varepsilon_{et2} \\ \therefore \varepsilon_{et2} &= A_{t2} \cdot (\varepsilon_{ot2} - \varepsilon_{ot1}) \\ \bullet \varepsilon_{\varphi t2} &= B_{t2} \cdot (\varepsilon_{ot2} - \varepsilon_{ot1} + \varepsilon_{Rt1}) \\ \bullet \varepsilon'_{Rt2} &= \varepsilon_{et2} - \varepsilon_{\varphi t2} \\ \therefore \varepsilon_{Rt2} &= \varepsilon'_{Rt2} + \varepsilon_{Rt1} \\ &= (A_{t2} - B_{t2}) \cdot \varepsilon_{ot2} - (A_{t2} - B_{t2}) \cdot \varepsilon_{ot1} \\ &\quad + (1 - B_{t2}) \cdot \varepsilon_{Rt1} \dots\dots\dots (4-6) \end{aligned}$$

○ t_n 時

$$\begin{aligned} \bullet \varepsilon_{Rtn} &= (A_{tn} - B_{tn}) \cdot \varepsilon_{otn} - (A_{tn} - B_{tn}) \cdot \varepsilon_{otn-1} \\ &\quad + (1 - B_{tn}) \cdot \varepsilon_{Rtn-1} \dots\dots\dots (4-7) \end{aligned}$$

本研究では、先に述べたように膨張能力 ε_{oti} は測定が不可能であるため、拘束鉄筋比 0.95% と代表鉄筋比として後に述べるその実測拘束

膨張ひずみ ϵ_{Rti} を次式で近似し、上述の理論式より膨張能力 ϵ_{oti} を逆算して求め、その値を他の拘束鉄筋比をもつ供試体における拘束膨張ひずみの計算に用いることとした。

$$\begin{cases} T \leq 1 \text{ day} \\ \epsilon_R = 87.2 \times e^T - 87.2 \quad (\times 10^{-6}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 1 \text{ day} \leq T \leq 7.7 \text{ days} \\ \epsilon_R = 1,622.5 \log T + 121.32 \quad (\times 10^{-6}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} T \geq 7.7 \text{ days} \\ \epsilon_R = T / (5.69 \times 10^{-4} \times T + 5.54 \times 10^{-4}) \quad (\times 10^{-6}) \end{cases}$$

..... (4-8)

単位 T : day

4-3. 試験方法

1) 使用材料・コンクリート示方配合

すべて第3章と同一である。

2) 供試体形状・寸法

拘束膨張ひずみ測定用の供試体はすべて一軸拘束状態とし、拘束鉄筋比を 0.95%，1.52%，1.91%，2.12% の 4 種類とした。供試体形状・寸法を図 (4-2) に示す。すべての供試体とも拘束を効果的に行うため鋼製端板を用いている。

3) 測定方法

供試体はすべて室内 (約 20℃、75% R.H) で湿布散水養生を行った。拘束膨張ひずみの測定を行ったが拘束鉄筋比によって測定法が異なるので各鉄筋比ごとの測定法を示す。

0.95% 供試体 : JIS A 6202 B法

1.52% 供試体 : 鉄筋計 (共和電業 (株) 製 BF-16C)

1.91% 供試体 : 材令 1 日までは鉄筋に貼布したストレインゲージ (検長 2 mm)、以降はコンタクトゲージ (基長 10 in)

2.12% 供試体 : 鉄筋に貼布したストレインゲージ (検長 2 mm)

4-4. コンクリートの弾性係数、クリープ係数

1) 弾性係数

弾性係数については第3章に述べたとおり、ここでも材令（時間）の関数として弾性係数を表示する必要がある。本章での使用コンクリートは第3章と全く同様のため、第3章の実験結果をそのまま流用する。

$$\begin{cases} t < 24 \text{ hrs} \\ E_c = \exp(0.249t + 6.41) \% \end{cases}$$

$$\begin{cases} T \geq 1 \text{ day} \\ E_c = 0.49 \log T + 2.4 \quad (\times 10^5 \%) \quad \dots\dots\dots (4-9) \end{cases}$$

2) クリープ係数

クリープ係数、特に膨張が平衡状態になるまで（一般に材令14日程度まで）の初期材令におけるクリープ係数についてはその評価が困難であるが、本研究では次のような方法を用いて初期材令のクリープ係数を時間の関数として表示した。図4-3に示すように、各載荷材令（第3章クリープ試験参照）ごとにクリープ係数～応力導入材令曲線をひき、その曲線を縦軸に外そうし、応力導入材令0日の値を求めこの値を膨張によって生ずるケミカルプレストレスによって発生するクリープ（膨張クリープ）に対するクリープ係数 φ_t とする。また、応力導入を材令0日から行ったときのクリープ係数の載荷時間Tによる値は実験結果から次式によって近似される。

$$\varphi_t = \frac{T}{0.425 + 0.227T} \quad (T \leq 14 \text{ day}) \quad (4-10)$$

単位； day

4-5. ま と め

本章では4-2で一軸拘束膨張ひずみの予測方法を理論的に示し4-3でその確認試験を行った。また、理論式に必要なコンクリートのクリープ係数、弾性係数については4-4で考察し両者を材令の関数として近似式で表示した。以下に本章で得られた結果を示し、本章のまとめとする。

1) 本章で示したように理論的に算出した膨張能力 ϵ_{ot} は、材令7日で40,795

$\times 10^{-6}$ 、材令 14 日で $116,419 \times 10^{-6}$ となる。一軸拘束下で弾性変形、クリープ変形しつつ膨張すると考えると、この程度の大きな膨張能力（無拘束膨張ひずみ）が必要であると考えられる。

- 2) 図 4-4～図 4-6 より、拘束鉄筋比 2.12 % の場合供試体がややマッシブであって水和熱の影響で計算値より早く最大膨張を示し、1.52 % の場合養生温度が打設時期の関係からやや低くなったため膨張発見が遅れたと思われるが、両者とも表 4-1 に示すように最大膨張量に対しては 9 割以上の精度で計算されている。
- 3) 拘束鉄筋比 1.52 %，1.91 %，2.12 % について各々膨張発現時期が 0.75 日，0.79 日，0.83 日と計算された。
- 4) 弾性係数、クリープ係数についてはなお今後の検討の余地があるが、この両者に対し安全率を考慮し、ある一定の使用材料や配合のもとでは代表的鉄筋比の一軸拘束膨張ひずみを実測すれば他の鉄筋比の場合でも本章に示す計算式および弾性係数、クリープ係数の近似値を用いることによって、比較的精度の良い一軸拘束膨張ひずみを計算することが可能で、ケミカルプレストレスを経済的かつ安全に設計へ導入することができると考えられる。

第 4 章 参考文献

- 1) 辻 ; コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究、
土木学会論文報告集、第 235 号、1975
- 2) 戸川・荒木 ; 膨張セメントコンクリートのケミカルプレストレスに関する研
究、プレストレストコンクリート Vol.14、No.2、1972
- 3) 岡村・国島 ; 膨張コンクリートの複合モデル化について、セメント技術年報、
XXVII、1973
- 4) 土木学会、プレストレストコンクリート標準仕様書、第 3 章、3.4 (2)

表 4 - 1

最大膨張ひずみの実測値と計算値

鉄筋比	実測値 (A)	計算値 (B)	A/B
1.52%	852	926	0.92
1.91%	663	679	0.98
2.12%	635	583	1.09

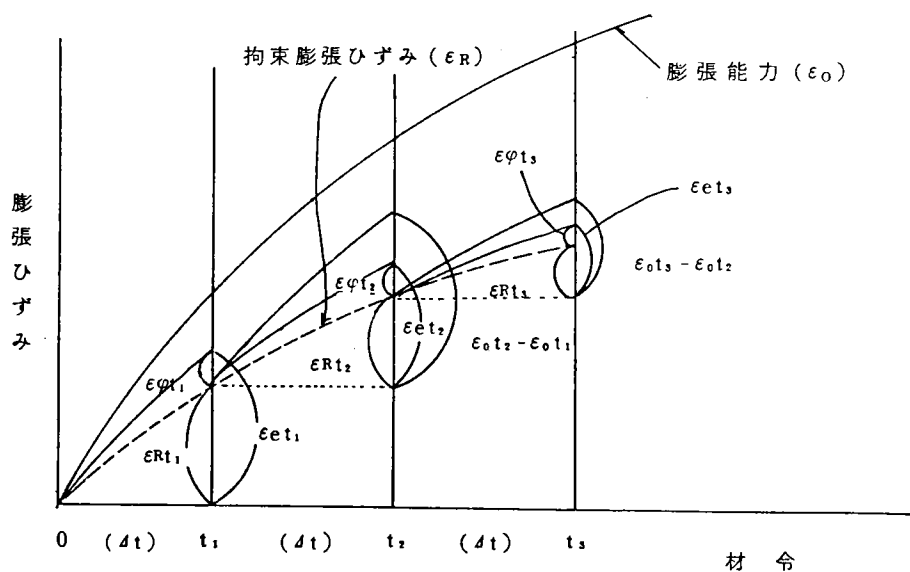
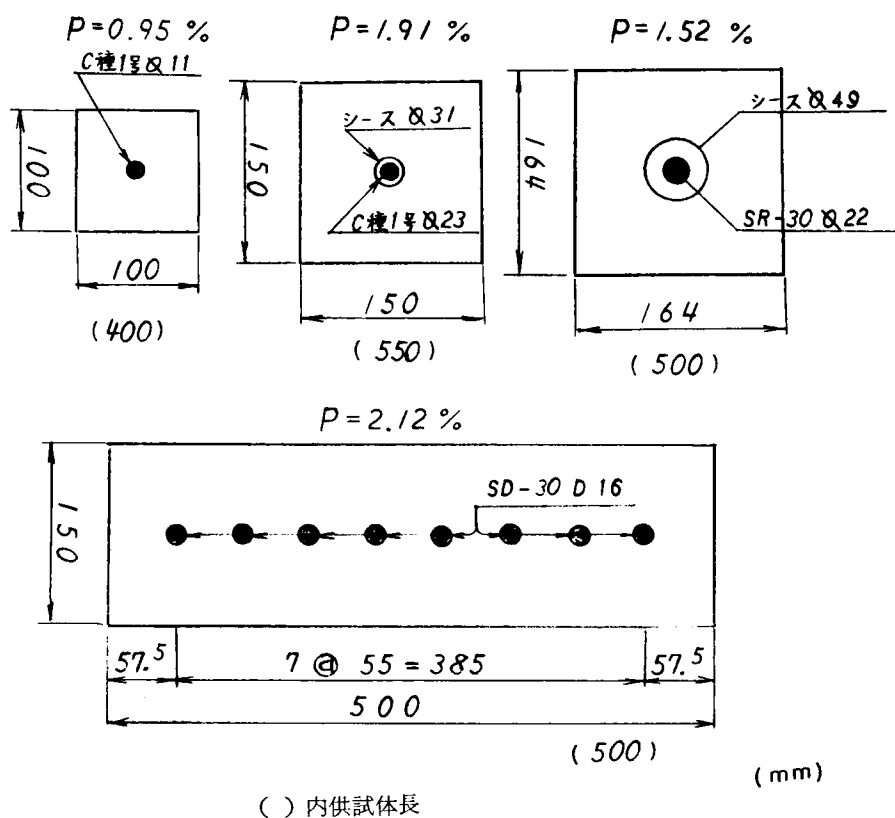


図 4 - 1 計算式の概念図



() 内供試体長

図4-2 供試体断面図

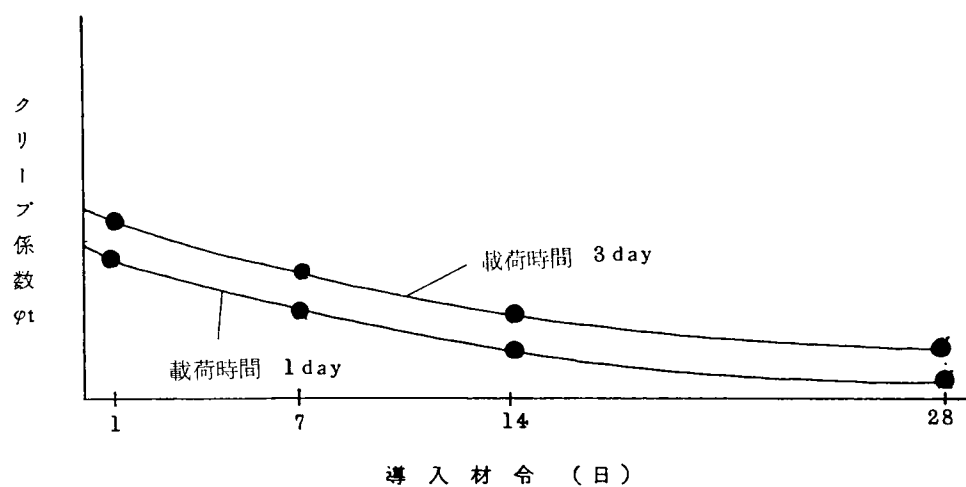


図4-3 膨張クリープ～導入材令

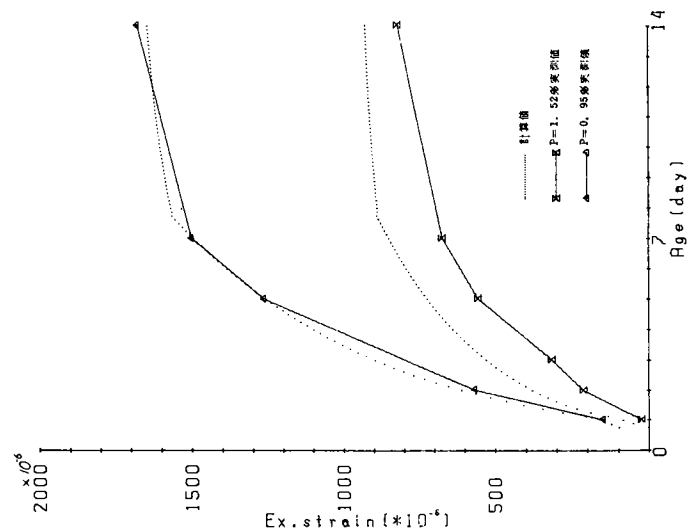


図 4-4

一軸膨張ひずみ実測値と計算値

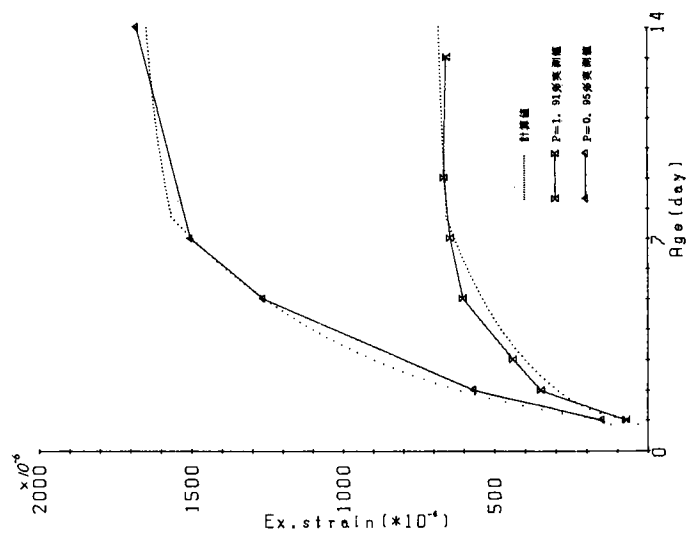


図 4-5

一軸膨張ひずみ実測値と計算値

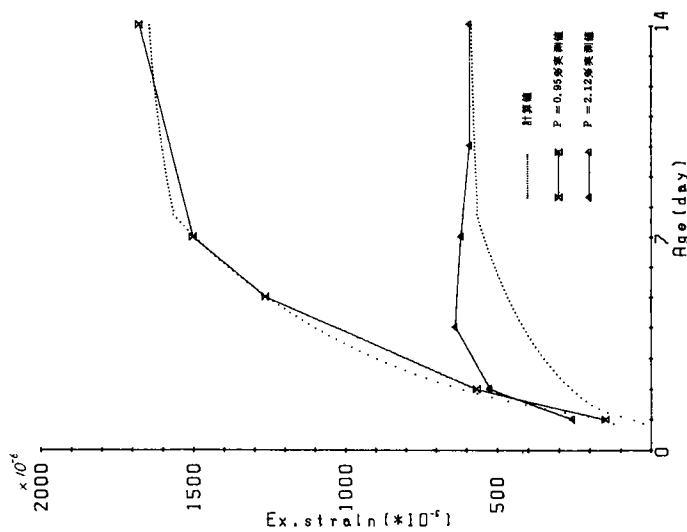


図 4-6

一軸膨張ひずみ実測値と計算値

第5章 二軸拘束下でのケミカルプレストレスの評価に関する研究

5-1. ま え が き

ケミカルプレストレストコンクリートを構造部材に適用する場合、特に膨張の拘束条件について考慮する必要がある。すなわち、一般のコンクリート構造部材を考えると多軸拘束である場合が多く、有効にケミカルプレストレスを利用するためには多軸拘束下における膨張特性、強度特性などを明らかにする必要がある。

現在までにこれらの特性については、いくつかの報告^{1)~8)}がなされているが研究者により異なる結論が示されており、また定性的な結果がほとんどであり定量化に至っていない。

また、多軸拘束の場合、一軸拘束に比べて同一配合、同一鉄筋比であっても一般的に軸方向拘束膨張ひずみが小さく、このため、ケミカルプレストレスが一見減少したかのような印象をうける。しかし、載荷試験によると膨張材無混入コンクリート（プレーンコンクリート）と比べて多軸拘束コンクリートの引張強度の増大は、一軸拘束の場合と同等もしくはそれ以上に増えている。これは膨張に寄与しないエネルギーがコンクリート組織の緻密化に働いたものと推察され、過去の研究⁴⁾にもあるようにこれをケミカルプレス効果と称することにする。

本章では多軸拘束下での諸特性解明（定量化、定式化）の一環として、二軸拘束の場合の強度特性（ケミカルプレス効果を含む。）ならびに膨張特性についての実験的検討を行い、二軸拘束下での拘束膨張ひずみの算定理論式を求めた。

5-2. 膨張の理論

1) 理論式の概念

本章で示す理論式は第4章の理論式の展開である。すなわち、主軸方向とそれに直角方向のケミカルプレストレスが相互に影響を与え膨張性水和

生成物の膨張が制限され、したがって膨張ひずみも互いに減少させられると仮定する。すなわち、主筋方向を x 軸とし、それと直角方向を y 軸とすると以下の式が成立するものと仮定する。

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{y0} - K \times \varepsilon_{Rx}$$

ここで、

ε_y : y 軸方向拘束膨張ひずみ

ε_{y0} : ケミカルプレストレスによる制限を受けない場合の y 軸方向膨張ひずみ

K : 膨張抑制係数（後述）

ε_{Rx} : x 軸方向拘束膨張ひずみ

一方、二軸拘束が成立していると考えられる場合、ポアソン効果による項を付加する必要があると考えられ、この場合には次式が成立するものとする。

$$\varepsilon_{Rx} = \varepsilon_{Rx0} - K_x \times \varepsilon_{Ry} + \nu \times \varepsilon_{cey}$$

$$\varepsilon_{Ry} = \varepsilon_{Ry0} - K_y \times \varepsilon_{Rx} + \nu \times \varepsilon_{cex}$$

ここで、

ε_{Rx} , ε_{Ry} : それぞれ x , y 方向の二軸拘束下での拘束膨張ひずみ

ε_{Rx0} , ε_{Ry0} : それぞれ x , y 方向のみの一軸拘束下での拘束膨張ひずみ

K_x , K_y : それぞれ x , y 方向膨張抑制係数

ν : ポアソン比

ε_{cex} , ε_{cey} : それぞれ x , y 方向のみの一軸拘束下でのケミカルプレストレスによる弾性ひずみ

また、以上の理論の前提として次の仮定をしている。

- (1) 膨張コンクリートの膨張は3次元的であるとし、その膨張能力（無拘束下における理論膨張ひずみ）はいずれの方向とも等しい。
- (2) 拘束状態下における膨張コンクリートの弾性係数、クリープ係数は配合によって決定されるものとし、一軸拘束、二軸拘束で差はないとする。

- (3) ある方向のケミカルプレストレスによってそれと直角方向の膨張ひずみは減少するが、その減少分は

$K \times (\text{減少する膨張ひずみの軸と直角方向の拘束膨張ひずみ})$
で計算されるものとする。

ここで K を膨張抑制係数と呼ぶこととし、拘束鉄筋比の関数とする。

2) 計 算 式

主筋、配力筋とも図 5-1 に示すように差分法で計算を行った。

ここで、

ε_{oti} : t_i 時の膨張能力

ε_{ceti} : t_i 時の一軸拘束下の弾性ひずみ

$\varepsilon_{\phi ti}$: t_i 時の膨張クリープひずみ

ε_{Roti} : t_i 時の一軸拘束下での拘束膨張ひずみ

ε_{Rti} : t_i 時の二軸拘束下での拘束膨張ひずみ

以下、主筋方向を x 、腹筋方向を y とする。

○ t_1 時

$$\varepsilon_{Rxt1} = \varepsilon_{Rxt1} - K_x \cdot \varepsilon_{Ryt1} + \nu \cdot \varepsilon_{ceyt1} \quad \cdots \cdots (5-1)$$

$$\varepsilon_{Ryt1} = \varepsilon_{Ryt1} - K_y \cdot \varepsilon_{Rxt1} + \nu \cdot \varepsilon_{cext1} \quad \cdots \cdots (5-2)$$

$$\varepsilon_{cext1} = \frac{n_{t1} \cdot p_x}{1 + n_{t1} \cdot p_x} \cdot \varepsilon_{ot1} \quad \cdots \cdots (5-3)$$

$$\varepsilon_{ceyt1} = \frac{n_{t1} \cdot p_y}{1 + n_{t1} \cdot p_y} \cdot \varepsilon_{ot1} \quad \cdots \cdots (5-4)$$

(5-3), (5-4) を (5-1), (5-2) に代入して整理すると、

$$\varepsilon_{Rxt1} = \frac{1}{1 - K_x \cdot K_y} \left\{ \varepsilon_{Rxt1} - K_x \cdot \varepsilon_{Ryt1} - \left(K_x \cdot \frac{n_{t1} \cdot p_x}{1 + n_{t1} \cdot p_x} - \frac{n_{t1} \cdot p_y}{1 + n_{t1} \cdot p_y} \right) \times \nu \times \varepsilon_{ot1} \right\}$$

$$\varepsilon_{Ryt1} = \frac{1}{1 - K_x \cdot K_y} \left\{ \varepsilon_{Ryot1} - K_y \cdot \varepsilon_{Rxot1} - \left(K_y \cdot \frac{n_{t1} \cdot p_y}{1 + n_{t1} \cdot p_y} - \frac{n_{t1} \cdot p_x}{1 + n_{t1} \cdot p_x} \right) \times \nu \times \varepsilon_{ot1} \right\}$$

○ t_n 時

$$\varepsilon_{cextn} = \frac{n_{tn} \cdot p_x}{1 + n_{tn} \cdot p_x} (\varepsilon_{otn} - \varepsilon_{otn-1})$$

$$\varepsilon_{ceytn} = \frac{n_{tn} \cdot p_y}{1 + n_{tn} \cdot p_y} (\varepsilon_{otn} - \varepsilon_{otn-1})$$

となるので、

$$\varepsilon_{Rxtn} = \frac{1}{1 - K_x \cdot K_y} \left\{ \varepsilon_{Rxotn} - K_x \cdot \varepsilon_{Ryotn} - \left(K_x \cdot \frac{n_{tn} \cdot p_x}{1 + n_{tn} \cdot p_x} - \frac{n_{tn} \cdot p_y}{1 + n_{tn} \cdot p_y} \right) \times \nu \times (\varepsilon_{otn} - \varepsilon_{otn-1}) \right\} \cdots \cdots (5-5)$$

$$\varepsilon_{Rytn} = \frac{1}{1 - K_x \cdot K_y} \left\{ \varepsilon_{Ryotn} - K_y \cdot \varepsilon_{Rxotn} - \left(K_y \cdot \frac{n_{tn} \cdot p_y}{1 + n_{tn} \cdot p_y} - \frac{n_{tn} \cdot p_x}{1 + n_{tn} \cdot p_x} \right) \times \nu \times (\varepsilon_{otn} - \varepsilon_{otn-1}) \right\} \cdots \cdots (5-6)$$

コンクリートの膨張能力は測定不可能であるため本方法では第4章と同様に、拘束鉄筋比0.95%の一軸拘束膨張ひずみの実測値から膨張能力を逆算して求めた。この膨張能力から第4章の方法を用いて ε_{Rxoti} 、 ε_{Ryoti} を求め、上述の理論式から二軸拘束下での拘束膨張ひずみを算出することができる。

5-3. 試験方法

1) 使用材料および示方配合

セメント、骨材、混和材ならびに示方配合は、第4章一軸拘束の場合と同一で、表5-1に示す。拘束鉄筋としては、D10、D13、D16(すべて材質SD30)を使用した。

2) 供試体形状・寸法

図 5-2 に供試体の形状・寸法を示す。全供試体とも $50 \times 50 \times 15 \text{ cm}$ (縦×横×厚さ) の版状供試体である。全供試体とも主筋方向鉄筋比は 2.12% で一定であるが、腹筋の有無および拘束方法によって以下の 3 種類に分類される。

a. 一軸拘束供試体 (供試体名 U-0)

主筋方向のみに鉄筋を配置し鋼製端板を用いて拘束を与えてある供試体。

b. 擬似二軸拘束供試体 (供試体名 U-10, U-20, U-50)

主筋、腹筋の両方向とも鉄筋は配置してあるが、主筋端部のみ鋼製端板で拘束を与えている。

c. 完全二軸拘束供試体 (供試体名 B-10, B-20, B-50)

主筋・腹筋の両方向に鉄筋を配置し、いずれの方向も鋼製端板を用いて拘束を与えている供試体。

以上の a、b、c の 3 種が供試体であるが、各供試体の主鉄筋比および腹鉄筋比を図 5-2 に示す。

3) 膨張ひずみ測定方法

供試体はすべて室内 (室温約 20°C 、75% R.H) で湿布散水養生を行った。

拘束膨張ひずみの測定は主筋、腹筋とも端部から供試体長の $1/8$ 、 $1/4$ 、 $1/2$ 位置に対面に貼布したストレインゲージ (検長 2mm) で行った。腹筋持たぬ U-0 供試体では主筋と直角方向の拘束膨張ひずみはホイットモア型コンタクトゲージ (基長 10in) によって測定した。

4) 曲げ載荷試験方法 (主筋と直角方向曲げ載荷試験)

材令 28 日で膨張ひずみ測定供試体について図 5-3 に示すように主筋と直角方向に支持スパン長 40cm とし、スパン中央 1 点載荷曲げ試験を行った。

コンクリート引張縁ひずみ ϵ_{ct} 、鉄筋ひずみ ϵ_s および中央点たわみを

X-Yレコーダーならびに自動デジタルプリンターによって測定し、荷重（P）はロードセルによって検出した。また、 $P \sim \epsilon_{ct}$ ならびに $P \sim \epsilon_s$ 図においてひずみの急変する点をもってひびわれ発生荷重とした。

5-4. 試験結果および計算結果

1) 膨張ひずみ測定結果

U-0、B-10、20、50の各供試体の膨張ひずみについては、供試体長の1/2位置での主筋ひずみと材令との関係を図5-4に示し、Uシリーズ、Bシリーズの各供試体について材令7日、14日における主筋ひずみと腹/主筋比の関係を図5-5に示す。また、Bシリーズについて腹筋ひずみと腹/主筋比の関係を図5-6に示す。また、材令14日における主筋および腹筋ひずみと端部からの距離との関係を図5-7、5-8に示す。これらより次のことがいえる。

- ① 図5-4、5-5よりUシリーズに比してBシリーズの方が主筋ひずみが $50 \sim 60 \times 10^{-6}$ 程度小さくなっており、腹筋の影響と考えられる。
- ② Bシリーズでは腹/主筋比が10～50%の範囲では主筋ひずみに大差はないが、腹筋量が増加する程、主筋ひずみが増加する傾向がある。過去の研究報告においては、本実験と同じく増加するもの^{5) 6)}と、減少するもの^{7) 8)}がある。
- ③ 一方、図5-6より主筋方向ケミカルプレストレスの腹筋方向膨張ひずみに及ぼす影響は顕著であり、腹鉄筋比0、0.286、0.476、1.183%について腹筋方向の実測二軸膨張ひずみと、腹筋方向のみを一軸拘束としたときの膨張ひずみの計算値の比較を表5-2に示すが、その比がそれぞれ0.018、0.18、0.27、0.72となり、二軸配筋のときは腹鉄筋比が小さいもの程腹筋方向の膨張が一軸拘束にくらべ抑制されていると考えられる。
- ④ 図5-8より、U-10、20、50では腹筋が端部から供試体長の約1/2の距離でもすべりを生じているようであり、異形鉄筋の付着のみの拘束では完全な拘束は与えられていない。

- ⑤ 端板で固定されている主筋のひずみについては、いずれの供試体でも端部からの距離の違いによる顕著な差はみられない。

2) 計 算 結 果

5-2 に示した計算式に従って計算を行ったが、膨張抑制係数の値は鉄筋比の関数と考えて定めた。

B-50 の場合の主筋ならびに腹筋ひずみと材令との関係について実測値と計算値との比較を図 5-10 に、B-10、20、50 および U-0 の主筋ならびに腹筋ひずみについて実測値と計算値の比較を表 5-3 に示す。これらから次のことがいえる。

- ① 図 5-9 より、膨張抑制係数と鉄筋比との関係は一つの関係で近似可能である。本実験の場合次式で表示される。

$$K_i = \frac{2.92}{p_i} - 1.61$$

ここで、

K_i : i 方向の膨張抑制係数

p_i : i 方向の拘束鉄筋比

- ② 図 5-10 より本実験供試体は水和熱の影響を考慮に入れる必要が生ずる大きさのためか、二軸拘束状態では一軸拘束状態に比して早い時期に膨張が平衡状態に至ると考えられる。³⁾
- ③ 腹筋 / 主筋比が増加する程、主筋ひずみの増加する傾向がみとめられる。この理由としては、鉄筋比が増加することにより腹筋方向に膨張しにくくなり、主筋方向への膨張移行が卓越してくるためと考えられる。

3) 曲げ載荷試験結果

主筋と直角方向（腹筋方向）の曲げ載荷試験において、荷重～コンクリート引張縁ひずみおよび荷重～たわみの関係について、代表例として B-10 の各図を図 5-11、5-12 に示す。

腹筋方向ケミカルプレストレス σ_{cp} を（拘束膨張ひずみ）×（鉄筋弾性係数）×（鉄筋比）によって計算した。なお、膨張ひずみとしては、供試

体長 1/2 点での腹筋膨張ひずみを使用している。

各供試体の腹筋膨張ひずみ、腹筋方向ケミカルプレストレス、ひびわれ発生荷重、部材曲げ強度 σ_{bt} 、ならびに型枠拘束のテストピースによる圧縮強度 σ_c 、弾性係数 E_c 、曲げ強度 σ_t を表 5-4 に示す。

また二軸拘束の場合、ケミカルプレストレスならびに先に述べたプレス効果 σ_p によって、単なる一軸拘束（本試験では U-0）の場合に比して腹筋方向の曲げ強度の増加 $\Delta\sigma_{bt}$ が望める。すなわち、

$$\Delta\sigma_{bt} = \sigma_{cp} + \sigma_p$$

という関係式が成立することが考えられる。表 5-5 に各供試体について、 $\Delta\sigma_{bt}$ 、 $\Delta\sigma_{bt} - \sigma_{cp}$ ($=\sigma_p$) の値を示す。

これらから以下のことが言える。

- ① U-0 について、部材曲げ強度とテストピースの曲げ強度はほぼ同等の値が得られているが、本実験では拘束端板の摩擦があるため曲げ強度に及ぼす拘束の影響の有無は判定し難い。
- ② 拘束鉄筋比の増加に従ってケミカルプレストレスは増加する傾向である。また、それにともないケミカルプレス効果も増加する傾向が認められる。拘束鉄筋比と部材曲げ強度およびケミカルプレストレスの測定値を図 5-13 に示す。
- ③ B シリーズと比較すると、U シリーズに認められるプレス効果は小さい。これは 1) で述べたように、異形鉄筋の付着のみでは完全に効果的な拘束が与えられないためだと考えられる。

5-5. ま と め

本章試験の結果、以下のことがいえる。

- 1) 二軸拘束供試体（B シリーズ）において、腹 / 主筋比が 50 % 以内の場合、主筋ひずみに対する腹筋の影響は顕著でなく、0 % すなわち一軸拘束供試体（U-0）との差でたかだか 70×10^{-6} 程度である。これは、過去の報告^{8) 9)}と一致している。

逆に、腹筋ひずみに対する主筋方向ケミカルプレストレスの抑制効果は

かなり大きく、腹鉄筋比の小さいもの程その抑制率が大きい。この抑制効果は本研究では膨張抑制係数としてとらえ、かつ拘束鉄筋比の関数として表示した。

- 2) 二軸拘束の場合、ある方向からその方向と直角方向への膨張ひずみの移行を考慮する必要があると考えられ、本研究ではポアソン効果として近似した。その結果、計算結果は測定値と最大膨張量で良い精度であった。
- 3) 二軸拘束のように多軸拘束となると、膨張コンクリートの効果としてケミカルプレストレスは当然としてケミカルプレスも存在する。よって、強度増加はこの両者の和で表わせると考えられるが、双方とも拘束鉄筋比の増加に伴って増加する傾向がある。
- 4) ポアソン比、膨張抑制係数は本研究では経時変化しないものとしているが、時間の関数として捉える必要があろう。また、ケミカルプレス効果の定量化についても今後の課題としたい。

第 5 章 参考文献

- 1) 飯田他 ; ケミカルプレストレスを導入する鉄筋コンクリート管の拘束条件に関する研究、土木学会論文報告集、第 225 号、1974
- 2) T.Y.LIN ; Chemical Prestressing of Concrete Elements Using Expanding Cements, A C I Journal , 1963
- 3) 長滝他 ; 多軸拘束を受ける膨張コンクリートの膨張性状、第 4 回コンクリート工学年次講演論文集、1982
- 4) 河野他 ; 石灰系膨張材を混和したコンクリートのケミカルプレスとケミカルプレストレスに関する検討、セメント技術年報、XXVI、1972
- 5) 楠元他 ; 石灰系膨張材がコンクリートの膨張および強度性状におよぼす影響、セメント技術年報、XXXI、1977
- 6) M.Polivka etc. ; Factors Affecting the properties of Expanding Concrete, Proc. International Conference on the Structure of Concrete (London 1965), Cement and Concrete Association, London, 1968
- 7) S. Aroni etc. ; Expansive Cements and Expanding Concrete, Department of Civil Engineering, Univ. of California, Report No. 66-7 1966
- 8) 戸川 ; ケミカルプレストレストコンクリートの利用に関する基礎的研究、京都大学学位論文、1982
- 9) 辻 ; ケミカルプレストレスの推定方法について、セメント技術年報、XXVII、1973

表 5-1 コンクリートの示方配合

Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight kg/cm ³					
					C	W	S	G	CSA	5L
25	14±1	3	45	40	360	158.4	648	1087	60	3.6

表 5-2 腹筋ひずみの実測値と腹筋方向一軸拘束としたときの計算値

腹鉄筋比 (%)	実測値 $\epsilon_{RS} \times 10^{-6}$	計算値 (一軸拘束と したとき) $\epsilon_{Rcal} \times 10^{-6}$	$\frac{\epsilon_{RS}}{\epsilon_{Rcal}}$
U-0 0	2,084	116,419*	0.018
B-10 0.286	1,105	6,037	0.18
B-20 0.476	971	3,533	0.27
B-50 1.183	910	1,267	0.72

* 理論的自由膨張ひずみ

表 5-3 実測値と推定式による計算値

	主筋方向ひずみ			腹筋方向ひずみ		
	ϵ_{pmea} ($\times 10^{-6}$)	ϵ_{pcal} ($\times 10^{-6}$)	$\frac{\epsilon_{pmea}}{\epsilon_{pcal}}$	ϵ_{lmea} ($\times 10^{-6}$)	ϵ_{lcal} ($\times 10^{-6}$)	$\frac{\epsilon_{lmea}}{\epsilon_{lcal}}$
B-10	560	575	0.97	1,105	1,050	1.05
B-20	579	576	1.00	971	1,010	0.96
B-50	586	581	1.01	910	901	1.01
U-0	635	583	1.09	—	—	—

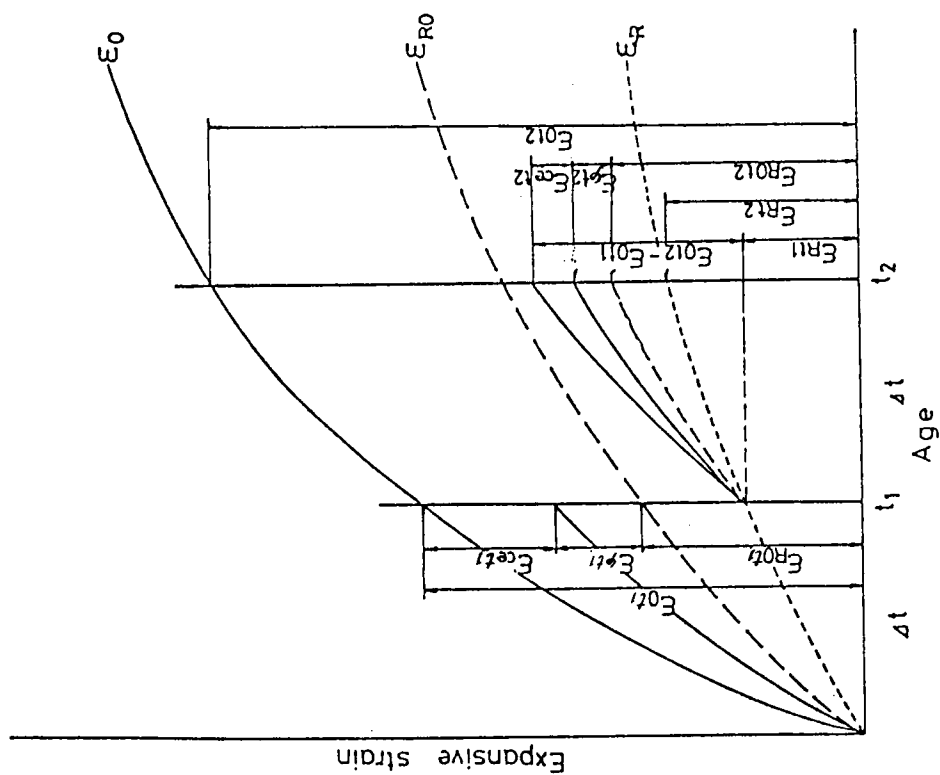
mea : 実測値 cal : 計算値
供試体材令 14日

表 5-4 腹筋方向ケミカルプレストレス，載荷試験結果およびコンクリートの諸強度等

供試体	腹筋ひずみ ($\times 10^{-6}$)	腹筋方向ケミカルプレストレス (kg/cm^2)	ひびわれ発生荷重 (ton)	部材曲げ強度 (kg/cm^2)	コンクリート圧縮強度 (kg/cm^2)	コンクリート弾性係数 ($\times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$)	コンクリート曲げ強度 (kg/cm^2)	コンクリート割裂強度 (kg/cm^2)
U-0	—	—	1 2.5 5	6 6.9	4 7 3	3.0 8	6 2.8	3 3.3
U-10	1,1 4 0	6.5	1 6.0 0	8 5.2	4 5 5	3.1 4	6 1.3	3 7.6
U-20	7 9 2	7.5	1 8.4 8	9 8.3	4 6 2	3.2 3	6 0.9	3 5.3
U-50	7 9 6	1 8.8	2 1.4 1	1 1 3.2	4 5 5	3.1 4	6 1.3	3 7.6
B-10	1,1 1 4	6.4	1 9.9 4	1 0 6.2	4 6 8	3.1 8	6 3.2	3 8.5
B-20	9 6 6	9.2	2 0.4 8	1 0 8.9				
B-50	8 7 5	2 0.7	2 5.7 2	1 3 6.1				

表 5-5 配力筋方向ケミカルプレス

供試体	$\Delta \sigma_{bt}$ (kg/cm^2)	$\Delta \sigma_{bt} \sim \sigma_{cp}$
U-10	1 8.3	1 1.8
U-20	3 1.4	2 3.9
U-50	4 6.3	2 7.5
B-10	3 9.3	3 2.9
B-20	4 2.0	3 2.8
B-50	6 9.2	4 8.5

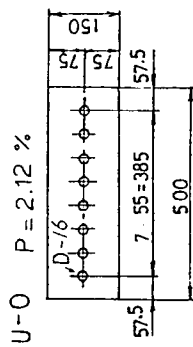


但し ϵ_{0t_1} : t_1 時の膨張能力
 ϵ_{cet_1} : t_1 時の一軸拘束下の弾性ひずみ
 $\epsilon_{\phi t_1}$: t_1 時の膨張クリープひずみ
 ϵ_{Rot_1} : t_1 時の一軸拘束下での拘束膨張ひずみ
 ϵ_{Rt_1} : t_1 時の二軸拘束下での拘束膨張ひずみ

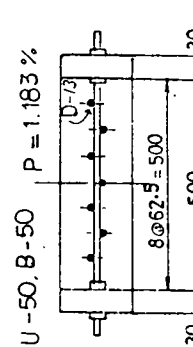
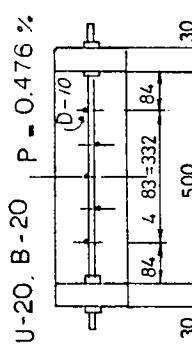
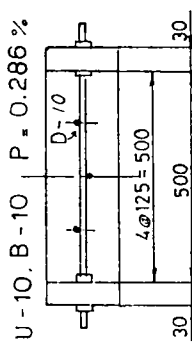
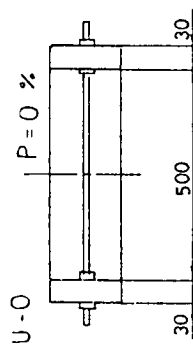
主軸方向を x 軸，腹筋方向を y 軸とする。

図 5-1 計算式の概念

主鉄筋



腹鉄筋



(mm)

図5-2 供試体形状・寸法

(mm)

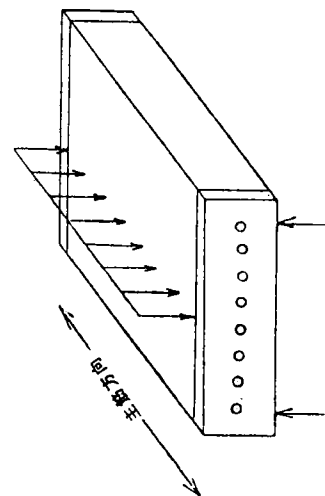
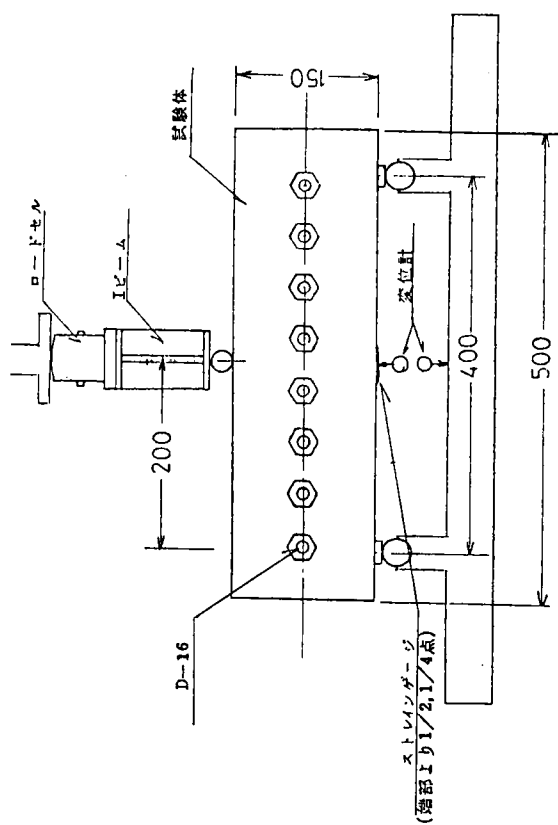


図5-3 載荷状況

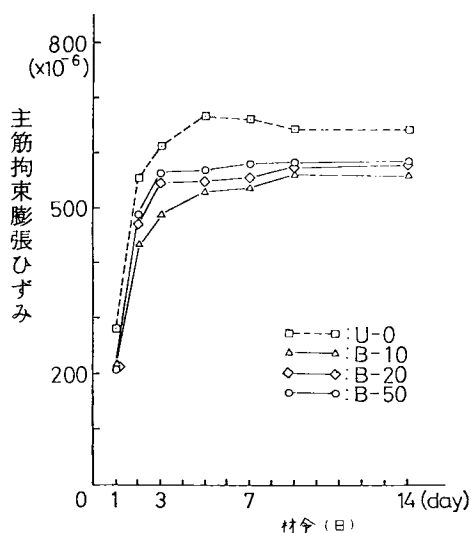


図 5-4 主筋拘束膨張ひずみ～材令

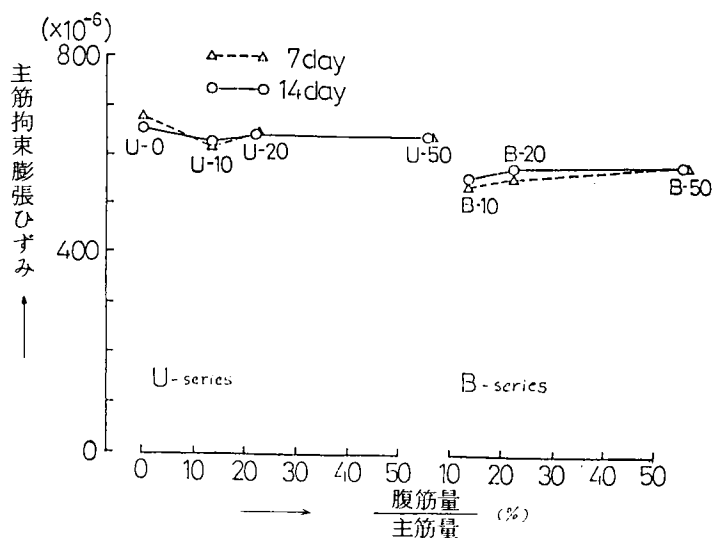


図 5-5 主筋ひずみ～(腹筋/主筋)

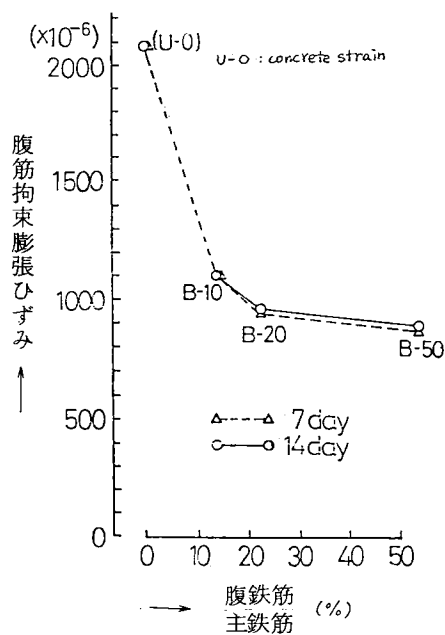


図 5-6 腹筋ひずみ～(腹筋/主筋)

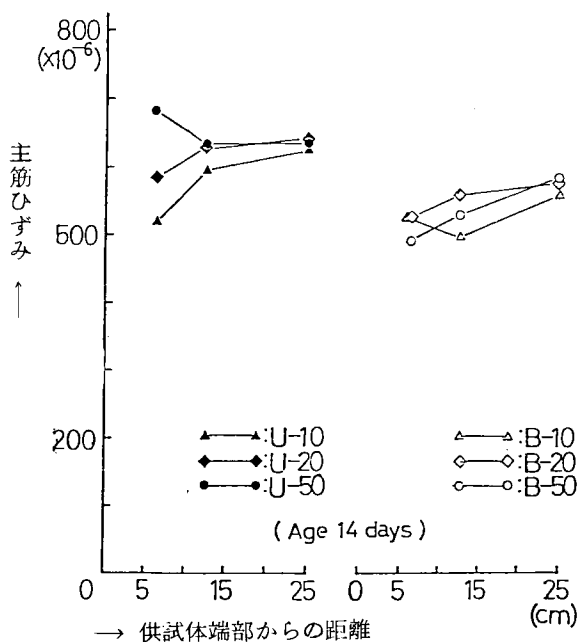


図 5-7

主筋ひずみ～供試体端部からの距離

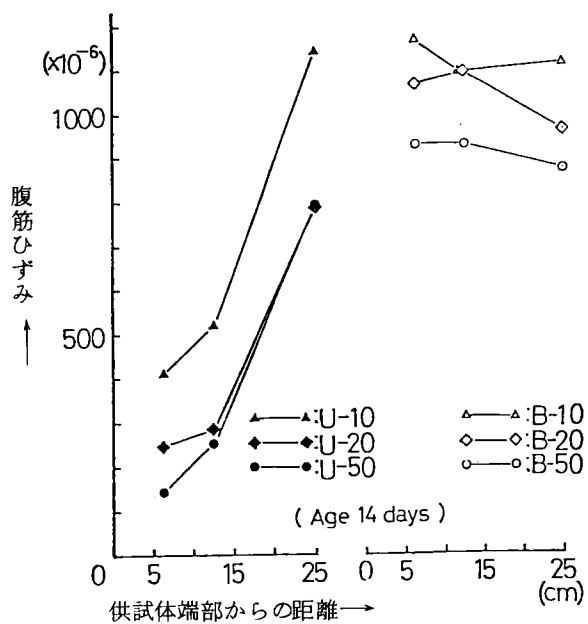


図5-8 腹筋ひずみ～供試体端部からの距離

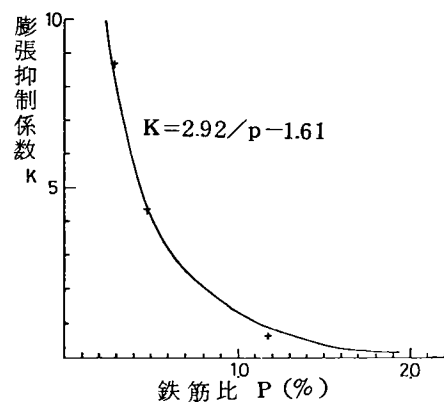


図5-9 膨張抑制係数

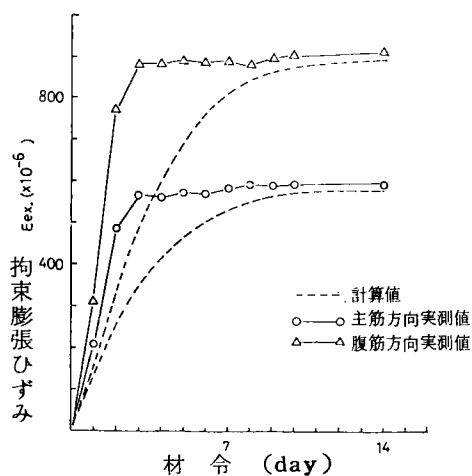


図5-10 計算値と測定値(B-50)

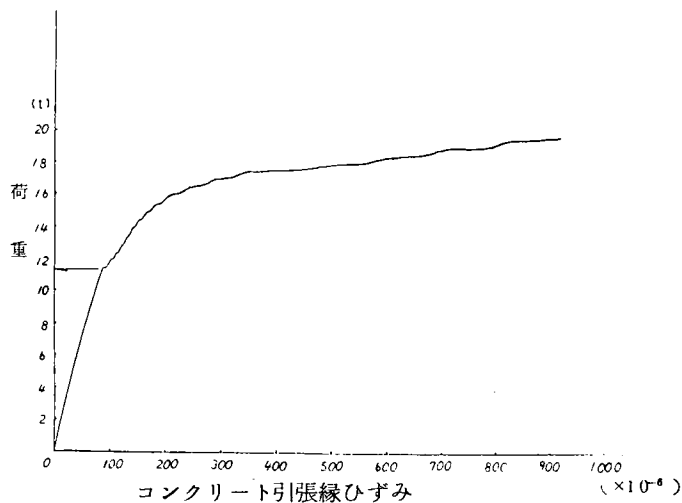


図5-11

B-10 供試体におけるひびわれ発生荷重

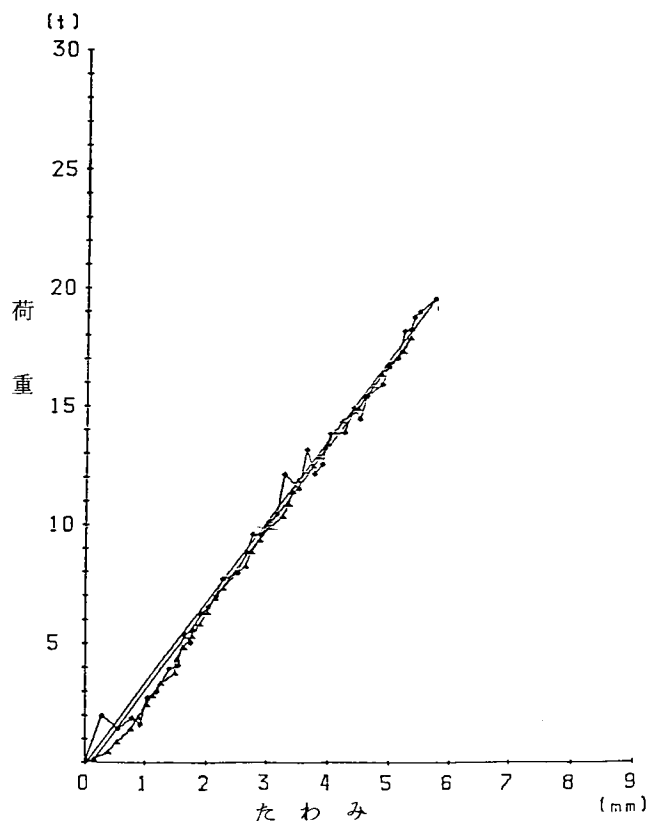


図5-12 B-10 供試体における荷重～たわみ関係

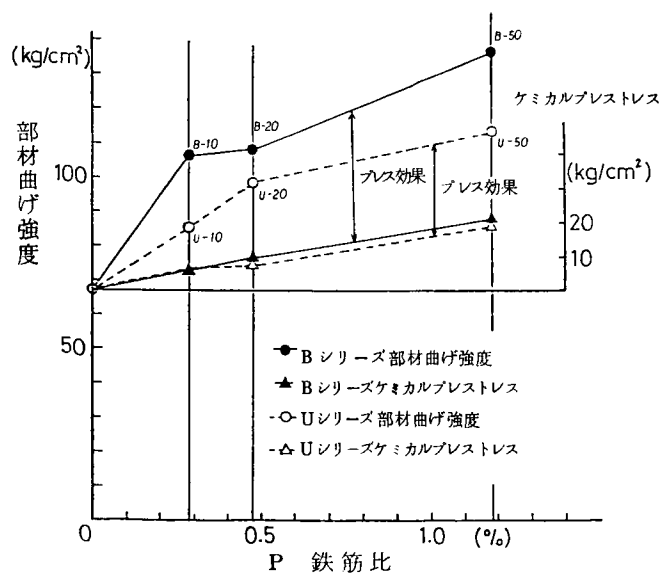


図5-13 ケミカルプレストレスとケミカルプレス

第 6 章 円筒型構造体におけるケミカルプレストレスの効果 とその評価に関する研究

6-1. ま え が き

中空円形断面の構造形式における膨張コンクリートの膨張は、アーチ作用によって周方向、半径方向とも膨張が抑制され、さらに鉄筋コンクリートの場合は周方向鉄筋による拘束も加算される。そして、この拘束状態は一軸拘束と二軸拘束の中間拘束状態であると推断される。

現在、この構造形式においてケミカルプレストレスを積極的に導入しているものとしては、タンク¹⁾ならびにヒューム管がある。後者では高強度管(2種管、3種管)の製作に有効的にケミカルプレストレスが利用されている。^{2) 3)}

しかし、管強度(外圧、内圧)に対するケミカルプレストレスの効果は確認されているが、その効果の定量的設計法は確立されていない。また、第5章で述べたごとく多軸拘束下での膨張コンクリートの膨張特性やケミカルプレストレス効果などの特性に関する研究は数少なく、統一的結論は得られていない。

本章は、鉄筋コンクリート中空円形断面における膨張ひずみ算定式を提案し、さらに円筒型試験体における膨張特性、内・外圧に対する強度特性に関するプレーンコンクリートとの比較実験結果を用いてケミカルプレストレスの効果とその評価について述べる。

6-2. 膨張の理論

1) 理論式の概念

鉄筋コンクリート中空円形断面の解析を平面応力問題として取り扱うこととし、以下の仮定⁴⁾を行う。

- ① RC中空円形断面を図6-1のように、中空コンクリート断面と全鉄筋量をもつ外側リングより成る厚肉パイプに近似でき、その接触面で圧力、ひずみの適合条件が成立するものとする。
- ② パイプに内圧 p_a が作用したとき、コンクリートパイプ、鉄筋リング間には、その接触面でコンクリートパイプには外側から、一方鉄筋リン

グには内側から半径方向力 $q(t)$ が作用する。膨張コンクリートの場合、膨張によって p_a の作用と同様に $q(t)$ が生じ、自己拘束および鉄筋拘束（以下、円形拘束と称す）による膨張抑制をそれに置換しうるとする。

③ （中空円形断面における膨張ひずみ）＝（一軸拘束膨張ひずみ）－（円形拘束による弾性ひずみ）－（円形拘束によるクリープひずみ）なる関係が成立する。

④ コンクリートの弾性係数、クリープ係数は、ある拘束下では配合によって決定され、一軸拘束の場合と円筒型の場合では大差ない。

また、対称断面であるから接触面での接線方向応力は 0 であり、内圧 p_a 、外圧 $q(t)$ が作用した場合の厚肉コンクリート断面の円周方向および半径方向応力、ひずみの解は次式で与えられる。

（円周方向応力）

$$\sigma_{c\theta}(t) = \frac{1}{r_b^2 - r_a^2} \cdot \left\{ r_a^2 \cdot \left(1 + \frac{r_b^2}{r^2} \right) \cdot p_a - r_b^2 \cdot \left(1 + \frac{r_a^2}{r^2} \right) \cdot q(t) \right\} \dots\dots\dots (6-1)$$

（半径方向応力）

$$\sigma_{cr}(t) = \frac{1}{r_b^2 - r_a^2} \cdot \left\{ r_a^2 \cdot \left(1 - \frac{r_b^2}{r^2} \right) \cdot p_a - r_b^2 \cdot \left(1 - \frac{r_a^2}{r^2} \right) \cdot q(t) \right\} \dots\dots\dots (6-2)$$

（円周方向ひずみ）

$$\epsilon_{\theta}(t) = \frac{1}{E_{ct}} \cdot \left\{ \sigma_{c\theta}(t) - \nu \cdot \sigma_{cr}(t) \right\} \dots\dots\dots (6-3)$$

2) 計 算 式

1) における仮定③を図式化すると図 6-2 のようであり、膨張コンクリートの場合上記 (6-1)、(6-2) 式において、 $P_a=0$ の場合に相当する。

○ $r=r_b$ におけるコンクリートのひずみを計算する。

(円周方向応力)

$$\sigma_{c\theta}(t) = \frac{-(r_b^2 + r_a^2)}{r_b^2 - r_a^2} \cdot q(t) \quad \dots\dots\dots (6-4)$$

(半径方向応力)

$$\sigma_{cr}(t) = -q(t) \quad \dots\dots\dots (6-5)$$

一軸拘束膨張ひずみ $S(t)$ とクリープを考慮した円周方向ひずみの和 $\epsilon_{c\theta\varphi}(t)$ は、式(6-3)を考慮して

$$\begin{aligned} \epsilon_{c\theta\varphi}(t) &= S(t) + \frac{\sigma_{c\theta}(t) - \nu \cdot \sigma_{cr}(t)}{E_c t} \\ &+ \int_0^t \frac{\sigma_{c\theta}(t) - \nu \cdot \sigma_{cr}(t)}{E_c t} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \cdot dt \\ &\doteq S(t) + \frac{\sigma_{c\theta}(t) - \nu \cdot \sigma_{cr}(t)}{E_c t} \cdot \left(1 + \frac{\varphi_t}{2}\right) \dots (6-6) \end{aligned}$$

○一方、内圧 $q(t)$ をうける鉄筋リンクの $r = r_b$ における円周方向ひずみ $\epsilon_{s\theta}(t)$ を計算する。

$$\begin{aligned} \epsilon_{s\theta}(t) &= \frac{1}{E_s} \cdot \frac{q(t) \cdot c}{\delta} \cdot \frac{2\pi \cdot c}{2\pi} \cdot \frac{1}{r_b} \\ &= \frac{q(t) \cdot c^2}{E_s \cdot A_s \cdot r_b} \doteq \frac{q(t) \cdot r_b}{E_s \cdot A_s} \quad \dots\dots\dots (6-7) \end{aligned}$$

ここに、 δ : 鉄筋リング厚さ (パイプの単位長さにおいては

$$\delta = A_s)$$

c : 鉄筋リングの中心の半径 ($c = r_b + \frac{\delta}{2}$)

E_s : 鉄筋の弾性係数

A_s : 鉄筋の断面積

境界における適合条件より、 $\epsilon_{c\theta\varphi}(t) = \epsilon_{s\theta}(t)$ であるから、

$$\frac{q(t) \cdot c^2}{E_s \cdot A_s \cdot r_b} = S(t) + \frac{\sigma_{c\theta}(t) - \nu \cdot \sigma_{cr}(t)}{E_c t} \cdot \left(1 + \frac{\varphi_t}{2}\right) \dots (6-8)$$

式(6-8)に式(6-4)、(6-5)を代入して整理すると

$$q(t) = \frac{S(t)}{L(t)} \quad \dots\dots\dots (6-9)$$

$$L(t) = \frac{c^2}{E_s \cdot A_s \cdot r_b} + \frac{1}{E_c t} \cdot \left(1 + \frac{\varphi t}{2}\right) \cdot \left\{ \frac{r_b^2 + r_a^2}{r_b^2 - r_a^2} - \nu \right\} \quad \dots\dots\dots (6-10)$$

また、円形拘束によるクリープ、膨張を考慮したときのコンクリートの円周方向応力は式(6-4)、(6-9)より

$$\sigma_{c\theta\varphi}(t) = - \frac{r_b^2 + r_a^2}{r_b^2 - r_a^2} \cdot \frac{S(t)}{L(t)} \quad \dots\dots\dots (6-11)$$

となり、膨張ひずみは式(6-7, 9, 10)より

$$\begin{aligned} \epsilon_{s\theta}(t) &= \frac{c^2}{E_s \cdot A_s \cdot r_b} \cdot \frac{S(t)}{\frac{c^2}{E_s \cdot A_s \cdot r_b} + \frac{1}{E_c t} \cdot \left(1 + \frac{\varphi t}{2}\right) \cdot \left(\frac{r_b^2 + r_a^2}{r_b^2 - r_a^2} - \nu\right)} \\ &= \frac{r_b}{E_s \cdot \delta} \cdot \frac{S(t)}{\frac{1}{E_c t} \cdot \left\{ \frac{r_b}{n_t \cdot \delta} + \left(1 + \frac{\varphi t}{2}\right) \cdot \left(\frac{r_b^2 + r_a^2}{r_b^2 - r_a^2} - \nu\right) \right\}} \\ &= \frac{r_b}{n_t \cdot (r_b - r_a) \cdot p} \cdot \frac{S(t)}{\frac{r_b}{n_t \cdot (r_b - r_a) \cdot p} + \left(1 + \frac{\varphi t}{2}\right) \cdot \left(\frac{r_b^2 + r_a^2}{r_b^2 - r_a^2} - \nu\right)} \end{aligned}$$

$$\text{ここに、 } r_b \div c \quad \dots\dots\dots (6-12)$$

$$n_t \div \frac{E_s}{E_c t}$$

$$A_s = \delta = (r_b - r_a) \times p \quad (\text{単位長当り})$$

p : 鉄筋比

S(t) : 一軸拘束膨張ひずみ

となる。

計算方法としては、第4章の方法で S(t) を求め、式(6-12)に代入して $\epsilon_{s\theta}(t)$ を求める。

6-3. 応力計算方法

1) 外圧の場合

円輪の垂直直径に沿って荷重が働く場合の解析であり、対称であるから軸の1/4部分図6-3のみを考えればよい。

図6-3においてmn断面に働く不静定モーメント M_0 を、mnが回軸しない条件でカスティリャーノの最小仕事の原理を用いて求め、任意断面のモーメントを解くと

$$M = \frac{P \cdot R}{2} \left(\cos \varphi - \frac{2}{\pi} \right)$$

となる。

ここで厚肉の場合、さらにせん断力、軸力の影響も考慮しなければならない。この場合、曲りはりを考え上記方法で求めると⁵⁾

$$M = \frac{P \cdot R}{2} \cdot \left(\cos \varphi - \frac{2}{\pi} + \frac{2 \cdot e}{\pi \cdot R} \right)$$

$$e = \frac{h^2}{12 \cdot R}$$

h : 厚さ

本実験の場合、

$$\frac{2 \cdot e}{\pi \cdot R} = 0.006$$

となり、本実験供試体寸法での外圧は薄肉で解いてよいと考えられる。

一方、自重によるモーメントを求める。

a. 上部断面

図6-4においてmn断面のモーメントは

$$M = M_0 - \frac{W}{4} \cdot R \cdot (1 - \cos \varphi) + \frac{\varphi}{2\pi} \cdot W \cdot R \cdot \left(\cos \frac{\varphi}{2} - \cos \varphi \right)$$

となる。

カスティリャーノの最小仕事の原理より

$$\frac{dU}{dM_0} = \frac{d}{dM_0} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{M^2}{2EI} d\varphi = \frac{1}{EI} \int_0^{\frac{\pi}{2}} M d\varphi = 0$$

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{\pi}{2}} M d\varphi &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left\{ M_0 - \frac{W}{4} \cdot R \cdot (1 - \cos \varphi) + \frac{\varphi}{2\pi} \cdot W \cdot R \right. \\ &\quad \left. \cdot \left(\cos \frac{\varphi}{2} - \cos \varphi \right) \right\} d\varphi \\ &= M_0 \cdot \frac{\pi}{2} - \frac{W \cdot R}{4} \cdot \frac{\pi}{2} + \frac{W \cdot R}{4} + \frac{W \cdot R}{2\pi} \\ &\quad \cdot \left(\pi \cdot \sin \frac{\pi}{4} + 4 \cdot \cos \frac{\pi}{4} - 4 - \frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi}{2} + 1 \right) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\therefore M_0 = \left(\frac{1}{4} - \frac{2\sqrt{2}-3}{\pi^2} - \frac{\sqrt{2}+2}{4\pi} \right) \cdot W \cdot R$$

よって、

$$M_{\varphi=\frac{\pi}{2}} = \left(\frac{1}{4} - \frac{2\sqrt{2}-3}{\pi^2} - \frac{\sqrt{2}+2}{4\pi} \right) \cdot W \cdot R - \frac{W \cdot R}{4} + \frac{W \cdot R}{4} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$\div -0.078 \cdot W \cdot R$$

b. 下部断面

図 6-5 において、mn 断面のモーメントは

$$M = M_0 - \frac{W}{4} \cdot R \cdot (1 - \cos \varphi) - \frac{\varphi}{2\pi} \cdot W \cdot R \cdot \left(\cos \frac{\varphi}{2} - \cos \varphi \right)$$

上記と同様の方法で $M_{\varphi=\frac{\pi}{2}}$ を求めると

$$M_{\varphi=\frac{\pi}{2}} = \left(\frac{1}{4} - \frac{2-\sqrt{2}}{4\pi} - \frac{3-2\sqrt{2}}{\pi^2} \right) \cdot W \cdot R - \frac{W \cdot R}{4} - \frac{\sqrt{2} \cdot W \cdot R}{8}$$

$$\div -0.241 \cdot W \cdot R$$

となる。

したがって、最大モーメントは下部断面に生じ

$$M_{\max} = \frac{P \cdot R}{\pi} + 0.241 \cdot W \cdot R$$

となる。

また、曲りはりの場合、重心の位置が図心と異なってくるが、力のつり合いから鉄筋コンクリートの場合の偏心距離 e を求める。

図 6-6 において、中立面より y の位置のひずみは、

$$\epsilon = \frac{y \Delta d\varphi}{(r-y) d\varphi}$$

圧縮鉄筋の位置は、

$$y = c - r - d$$

引張鉄筋の位置は、

$$y = r - a - d$$

力のつり合いから

$$\int_A \frac{y \Delta d\varphi}{(r-y) d\varphi} \cdot E_c dA + \left\{ \frac{(c-r-d) \Delta d\varphi}{(r-c+r+d) d\varphi} - \frac{(r-a-d) \Delta d\varphi}{(r-r+a+d) d\varphi} \right\} \\ \cdot E_s \cdot A_s = 0$$

ここで、

$$y = r - V$$

$dA = b \cdot dV$ であるから、

$$\int_A \frac{y}{r-y} dA = \int_a^c \frac{r-V}{V} b \cdot dV = r b \int_a^c \frac{1}{V} dV - b \cdot (c-a) \\ = r \cdot b \cdot \ell n \frac{c}{a} - b \cdot h$$

ゆえに、

$$E_c \cdot (r \cdot b \cdot \ell n \frac{c}{a} - b \cdot h) + \left(\frac{c-r-d}{2r-c+d} - \frac{r-a-d}{a+d} \right) \cdot E_s \cdot A_s = 0$$

$$e = R - r$$

本実験における e を求めると、

周方向鉄筋比 1 % の場合 : $e = 0.36 \text{ cm}$

周方向鉄筋比 2 % の場合 : $e = 0.15 \text{ cm}$

である。

以上の解析から、換算断面 2 次モーメント I_e を求め

$$\sigma = \frac{M}{I_e} \cdot y$$

より応力を算出する。

2) 内圧の場合

本実験の場合、内圧に対しては、(肉厚の中心までの半径)と(厚さ)との比が 2.88 であるため、厚肉で解析すべきと判断される。

図 6-7 において、対称の条件から mnm_1n_1 の各辺には、せん断応力は発生しない。ゆえに角 $d\varphi$ の 2 等分線方向の力のつり合いから、

$$\sigma_r \cdot r d\varphi + \sigma_t dr d\varphi - \left(\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr \right) \cdot (r + dr) \cdot d\varphi = 0$$

高次項を無視すると、

$$\sigma_t - \sigma_r - r \cdot \frac{d\sigma_r}{dr} = 0 \quad \dots\dots\dots (6-13)$$

また、半径 r なる円形面の変位を u とすれば、半径 $r+dr$ の面の変位は、

$$u + \frac{du}{dr} dr$$

となり、 mnm_1n_1 部分は半径方向に $\frac{du}{dr} \cdot dr$ だけ伸びることになり、ひずみは

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}$$

となる。

一方、円周方向のひずみは、

$$\varepsilon_t = \frac{(r+u) d\varphi - r d\varphi}{r d\varphi} = \frac{u}{r}$$

となる。

ここで、平面応力の関係から

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{du}{dr} + \nu \cdot \frac{u}{r} \right)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{u}{r} + \nu \cdot \frac{du}{dr} \right)$$

となり、式(6-13)に代入すると

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0$$

この一般解は $u = c_1 r + \frac{c_2}{r}$ であり、

$(\sigma_r)_{r=a} = -q$, $(\sigma_r)_{r=b} = 0$ より、 c_1 , c_2 を求めると、

$$c_1 = \frac{1-\nu}{E} \cdot \frac{a^2 q}{b^2 - a^2}$$

$$c_2 = \frac{1+\nu}{E} \cdot \frac{a^2 \cdot b^2 \cdot q}{b^2 - a^2}$$

よって、

$$\sigma_r = \frac{a^2 \cdot q}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_t = \frac{a^2 \cdot q}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right)$$

内圧に対して発生する応力は上記のごとく形状によって決定されるが、鉄筋コンクリート管の場合のひずみならびにコンクリートの応力負担は、合成弾性係数 $(1+n \cdot p) \cdot E_c$ を有する管として解析してよいと考えらる。すなわち、本実験において内、外縁ならびに鉄筋位置での応力は、各々

内 縁：

$$\sigma_t = \frac{27.8^2}{39.5^2 - 27.8^2} \cdot \left(1 + \frac{39.5^2}{27.8^2}\right) \cdot q = 2.96q$$

内側鉄筋位置：

$$\sigma_t = \frac{27.8^2}{39.5^2 - 27.8^2} \cdot \left(1 + \frac{39.5^2}{31.15^2}\right) \cdot q = 2.56q$$

外側鉄筋位置：

$$\sigma_t = \frac{27.8^2}{39.5^2 - 27.8^2} \cdot \left(1 + \frac{39.5^2}{36.15^2}\right) \cdot q = 2.15q$$

外 縁：

$$\sigma_t = \frac{27.8^2}{39.5^2 - 27.8^2} \cdot \left(1 + \frac{39.5^2}{39.5^2}\right) \cdot q = 1.96q$$

となり、ひずみは

$$\varepsilon = \frac{\sigma_t}{(1 + n \cdot p) \cdot E_c} \quad \begin{array}{l} n : \text{弾性係数比} \\ p : \text{鉄筋比} \end{array}$$

で算出できる。

6-4. 試験方法

1) 使用材料と示方配合

セメント、骨材、混和材（剤）ならびに示方配合は、第4章の場合と同一である。

拘束鉄筋としてφ4、φ5、φ6（材質：SR30）を使用した。

2) 供試体形状、寸法

図6-8～6-11に各供試体形状、寸法を示す。全ての供試体は、（外径）79cm×（長さ）120cm×（厚さ）11.7cmの円筒型供試体であり、周方向（主筋）鉄筋比および軸方向（腹筋）鉄筋比、ならびに養生条件は各々の試験によって異なっており、試験条件を表6-1に示す。

なお供試体記号は、Pが普通コンクリートをCSAが膨張コンクリートであることを示し、数字は順に主鉄筋比、腹鉄筋比（%）を示す。また、

W, Sはそれぞれ湿布養生、気乾養生（材令 14 日までは湿布養生）を、最後の数字は試験材令を示している。

3) 供試体の作成

供試体の作成については、生コン工場でコンクリートを混練し、ミキサー車で軸方向縦打ちに打設した。締め固めは棒状バイブレーターによって行った。

打設後、翌日脱型して、以後の養生は 2 種類あり、室内で湿布（散水）養生を W と称し、14 日間湿布（散水）養生後、室内気乾養生を S と称す。

4) 測定方法

a. 膨張試験

1-0.0, 1-0.2, 1-0.5, 2-0.0, 2-0.4, 2-1.0 の供試体の膨張ひずみ測定は、埋め込みゲージ（カールソン型、検長 10 cm）と鉄筋ゲージ（検長 2 mm、鉄筋の対面に 2 液接着剤で貼布）によって行った。

その結果、埋め込みゲージと鉄筋ゲージの測定値には大差なかったので、1-0.3, 1-0.4, 2-0.6, 2-0.8 の供試体については、埋め込みゲージで測定を行った。

測定位置を図 6-12 に示す。

b. 外圧試験

外圧試験は、ヒューム管の外圧試験方法（JIS A 5303）に準じて行い、はり試験と同様ひびわれ発生後引張側鉄筋ひずみが約 200×10^{-6} となった時点で 0.5 t まで除荷し、再載荷して破壊に至らせた。

軸方向供試体長 1/2 点のコンクリート引張縁ひずみ（120 mm ストレインゲージによる）、圧縮側および引張側円周方向鉄筋ひずみ（2 mm ストレインゲージによる）、上下半径方向変位（たわみ）、ならびに管端部ひびわれ幅（ ϕ 型ゲージによる）を自動デジタルプリンターおよび X-Y レコーダーによって測定した。荷重はロードセルによって検出した。実験方法略図を図 6-13 に示す。

また、ひびわれ発生荷重の判定については発生時のひびわれ幅が小さ

くコンクリートに貼布したゲージが切断されず判定が困難であり、端部にセットした ϕ 型ゲージでは管長が長くひびわれの進展が遅れるため判定が遅れる。そこで圧縮鉄筋と引張鉄筋ひずみの差の変曲点をもってひびわれ発生とした。

c. 内圧試験

内圧試験は、ヒューム管の内圧試験（JIS A 5302）に準じて、両端面にゴムパッキンを介して鋼製端板を当て、中央2本（ $\phi 44\text{mm}$ ）、周辺10本（ $\phi 19\text{mm}$ ）のPC鋼棒によって固定し、電動ポンプ（最大水圧45%）で水圧を加えるという方法で行った。なお、PC鋼棒の締め付けによるコンクリート軸方向ひずみは約 20×10^{-6} 程度であり内圧によってキャンセルされ無視できうる。

軸方向中央部、コンクリート外縁の円周方向ならびに軸方向ひずみ（60mmストレインゲージによる）、および有筋の場合、周方向内側、外側鉄筋ひずみ（2mmストレインゲージによる）を自動デジタルブリスターによって測定した。また、端板の摩擦の影響を確認するため材令14日のものについて端部より10, 30, 60cm位置のコンクリート外縁周方向ひずみを測定した。

水圧の検出は、導水管に取り付けた水圧計（最小目盛0.5%）にて行った。

試験方法略図を図6-14に示す。

また、内圧試験においては、内縁に最大応力が発生し、クラック発生後は断面が減少して急激にクラックが進展するため、最大応力到達後即漏水に至る。そこで、最大水圧における内縁応力をもって円筒管の引張強度とした。

6-5. 試験結果および計算結果

1) 供試体記号の説明

供試体記号を以下に凡例を用いて説明する。

CSA	—	1	—	0.2	W	—	14
①		②		③	④		⑤

- ① コンクリートの種類。CSA：膨張コンクリート、P：プレーンコンクリート
- ② 円周方向鉄筋比（％）
- ③ 軸方向鉄筋比（％）
- ④ 養生条件（表 6－1 参照）
- ⑤ 材 令（日）

2) 膨張ひずみ測定結果

表 6－1 に示す各膨張試験供試体の材令と円周方向ならびに軸方向鉄筋ひずみを付図 6－1～6－16 に示す。また、7 日、28 日材令における軸方向および円周方向膨張ひずみと、軸方向（腹筋）と円周方向（主筋）の鉄筋比の比との関係を図 6－15 に示し、同じく 7 日、28 日の材令における軸方向ケミカルプレストレスと（腹筋）／（主筋）比との関係を図 6－16 に示す。

これらより次のことが言える。

- ① 付図より、CSA－1－0.2 および CSA－2－0.0 の軸方向膨張ひずみを除いて端面からの距離の違いによる顕著な膨張ひずみの差は測定されなかった。

また、端部の膨張クラックが全く観察されなかったことから、円筒という形状の拘束に及ぼす影響はかなり大きいと考えられ、端面より 20 cm 程度離れた位置では、一定膨張が得られるようである。

- ② 腹筋の主筋膨張ひずみに及ぼす影響は顕著ではなく、腹筋 0.029% のものに比して $80 \sim 100 \times 10^{-6}$ 程度主筋ひずみが小さいものの、腹／主筋比 20，30，40，50% の範囲では、主筋ひずみの顕著な差は認められない。
- ③ ②の理由の一つとして、軸方向の鉄筋比の増加に伴って軸方向ケミカルプレストレスも増加しているものの、腹／主筋比 50% の場合でも主

筋 1% で約 6‰、2% で約 8‰と小さいことが考えられる。

- ④ 一軸拘束の場合、鉄筋比 1.58% で $750 \sim 800 \times 10^{-6}$ 、21.2% で 600×10^{-6} 程度の膨張ひずみが得られたが、同一配合で円筒型の軸方向筋 0% の場合、主筋比 1% で 650×10^{-6} 、2% で 450×10^{-6} 程度の膨張ひずみであり、すでに述べたごとく形状拘束（自己拘束）により膨張がより強く抑制されるようである。
- ⑤ 材令 7 日もしくはそれ以前にほぼ膨張がピークに達し平衡状態となる傾向であり、第 5 章二軸拘束の場合と同様、水和熱ならびに多軸拘束のためピーク到達時期が早まったと推察される。
- ⑥ 普通コンクリートについては、膨潤によるものと考えられるが、 50×10^{-6} 程度の膨張側のひずみが測定された。
- ⑦ 14 日間湿布養生以後気乾養生のものについて、供試体保管場所の湿度が 85～95% と高く、また形状による影響とも考えられるが、全ての気乾養生供試体について約 100×10^{-6} 程度の乾燥収縮ひずみしか測定されなかった。

3) 膨張ひずみ計算結果

本実験では腹鉄筋中空円筒管であるが、これを全鉄筋量をもつ外側リングを外周に有する厚肉コンクリート管として近似し、6-3 に示した計算式に従って計算を行った。

材令 14 日における CSA-1-0.0，CSA-2-0.0 の円周方向膨張ひずみについて測定値と計算値の比較を表 6-2 に示す。なお、計算に用いる一軸拘束膨張ひずみは、第 4 章の方法で求めた計算値であり、それも表 6-2 に併記する。また、CSA-2-0.0 の材令と膨張ひずみの関係について測定値と計算結果を図 6-17 に示す。

主筋比 2% の場合、本理論式によって精度よい近似が計算されているが、主筋比 1% の場合、測定値と計算値の比が 0.51 となっている。本理論式では円形拘束（自己拘束）ならびに鉄筋による拘束を外圧の作用に置換しわけであるが、多軸拘束の場合さらに第 5 章で述べたごとく膨張抑制係数

なるものを鉄筋比の関数として導入する必要があると考えられる。しかし、本実験においては1%と2%の2水準しかなく、その関数型を求め得ず、この点については今後の課題としたい。

4) 外圧試験結果

各々の供試体によって打設日が異なっており、各グループのテストピースによるコンクリート諸強度を表6-3に示す。

引張側鉄筋ひずみと荷重との関係の図に、ひびわれ発生近傍までの圧縮側鉄筋ひずみを破線で付記したもの、ならびにたわみと荷重との関係について代表例としてCSA-2-0.4W-14のものを図6-18、6-19に示す。

コンクリート引張線ひずみならびに、 ϕ 型ゲージによるひびわれ幅と荷重との関係を同じくCSA-2-0.4W-14について各々図6-20、6-21に示す。

また、ケミカルプレストレス量の算定は、はり試験と同様に膨張ひずみから算出したもの σ_{cp} と、ひびわれ発生後除荷、再載荷時の引張鉄筋ひずみと処女曲線の平行部分の荷重によって算出したもの σ_{cpe} と2種類で行った。

各供試体の膨張ひずみを表6-4に示し、ひびわれ発生荷重、応力、ならびに破壊荷重などを表6-5に示す。

ケミカルプレストレス量を表6-6に、 σ_{cp} と σ_{cpe} との比較ならびにケミカルプレスを表6-7に示す。また、普通コンクリートについて、ひびわれ発生応力とテストピースによる曲げ強度の比較を表6-8に示す。

一方、全ての供試体について、自重は $\pm 10\text{ kg}$ の範囲で 700 kg であった。外圧試験結果から以下のことが言える。

- ① 円筒型の場合も、はりの場合と同様 σ_{cp} と σ_{cpe} とは大差なく、ケミカルプレストレス量は(膨張ひずみ) \times (鉄筋弾性係数) \times (鉄筋比)によって算出できる。
- ② 2)で述べたごとく円筒型においては膨張が抑制され、一軸拘束に比

してケミカルプレストレス量は小さくなる。しかし、プレーンに比してケミカルプレストレス量以上の強度増加も測定されており、第5章で述べたごとくケミカルプレス効果による強度増加が付加されるものと考えられる。

③ 本実験では、CSA-1-0.2W-14、CSA-1-0.4W-14の場合を除けば、ケミカルプレストレスとほぼ同等値のケミカルプレス効果が得られている。

④ 主筋比2%の場合、腹/主筋比20, 30, 40%の間でプレス効果は大差なく、膨張ひずみの場合と同様腹筋の顕著な影響はないようである。また主筋比1%の場合、腹/主筋比40%のものは小さくなっているが、20, 30%の間では大差ない。

5) 内圧試験結果

端部からの距離と円周方向ひずみの関係を各水圧ごとにP-2-0.4W-14、CSA-2-0.4W-14について図6-22に示す。

各供試体の円周方向膨張ひずみを表6-9に示し、ひびわれ発生水圧、応力とテストピースによるコンクリート諸強度を表6-10に示す。また、膨張ひずみから算出したケミカルプレストレスとケミカルプレスを表6-11に示す。

普通コンクリートのひびわれ発生時のコンクリートの引張応力負担分 σ_{te} とテストピースの引張強度 σ_t との比較を表6-12に示す。

また、水圧とコンクリートひずみ、内側ならびに外側鉄筋ひずみの関係についてCSA-2-0.4W-14を代表例に選び各々図6-23~6-25に示す。なお、理論値を破線で付記した。

本実験結果より以下のことが言える。

① 水圧載荷をした場合、端部からの距離の違いによって円周方向、軸方向ともひずみの差は小さく、端部より10cm以上離れた位置では端板の摩擦の影響はないものと考えられる。

② 内圧が作用した場合、引張応力が発生するわけであるが、外圧試験

(曲げ応力が発生)の場合と同様にケミカルプレス効果が確認された。

- ③ ケミカルプレストレスについては、材令による変化は測定されないが、ケミカルプレス効果は材令に伴って減少する傾向が見られる。これは、普通コンクリートの強度と比較してケミカルプレス効果を算出しているのであるが、材令による膨張コンクリートの引張強度増加が緩慢であるのに対して、普通コンクリートのそれが大きく、両者の引張強度の差が減少するためと考えられる。すなわち、多軸拘束下における膨張コンクリートの引張強度は、膨張ひずみと同様に早期にピークに達し平衡状態となると考えられ、圧縮強度と発現パターンを異にすると推察される。
- ④ 膨張コンクリートの無筋管において、膨張クラックが全く観察されておらず、またプレーンに比して3～4%の引張強度増加が得られており、形状拘束によるケミカルプレス効果と推察され円形拘束(自己拘束)の存在が確認された。
- ⑤ 気乾養生の場合、ケミカルプレストレス、ケミカルプレスともに湿布養生のものに比して減少しており、管引張強度は6～9%程度の低下を示している。
- ⑥ 水圧と鉄筋ならびにコンクリートひずみの関係に対して計算値が精度よい近似値を与えており、内圧を受ける鉄筋コンクリート管は $(1+n \cdot p) \cdot E_c$ なる弾性係数を有する管として解析できうる。
- ⑦ 普通コンクリートについて、鉄筋コンクリート内圧強度はテストピースによる割裂強度によって充分推定できる。

6) ケミカルプレス効果に関する一考察

二軸拘束体ならびに円筒管の載荷試験によってケミカルプレス効果の存在が確認されたが、本試験範囲内でその量について考察する。

第3,4,5,6章の試験結果から、鉄筋比0.286%, 0.476%, 0.95%, 1.0%, 1.183%, 1.52%, 2%, 2.12%の場合における、一軸拘束下でのケミカルプレストレス σ_{cp-u} ならびに多軸拘束でのケミカルプレストレス σ_{cp-M} 、ケミカルプレス σ_p について材令28日の実測値および第4章の方

法で計算した計算値を表 6-13 に示す。

多軸拘束の場合、その鉄筋比の一軸拘束での σ_{cp-u} は計算値を用いたが、表より精度よい近似値が計算されていると推察される。

二軸拘束で腹 / 主筋比 50 % の場合を除けば、多軸拘束下での効果（ケミカルプレストレス＋ケミカルプレス）は一軸拘束下でのケミカルプレストレスより大きい、その差は顕著ではない。すなわち、多軸拘束下での膨張コンクリートの効果は一軸拘束下でのケミカルプレストレスによって安全側に精度よく推定できると考えられる。

一方、二軸拘束で腹 / 主筋比 50 % の場合、多軸拘束での効果が一軸のその 2 倍強である。また、第 5, 6 章で述べたごとく腹筋の主筋に及ぼす影響は顕著でなく、逆に第 5 章で述べたごとく主筋の腹筋への影響は顕著であり、これらのことから、ある値以下の鉄筋比では拘束条件の影響を強く受け、膨張ならびに強度性状に対して最適鉄筋比の存在が予想される。

6-6. ま と め

本試験の範囲内で以下のことが言える。

- ① 中空円なる形状において、同一鉄筋比において一軸拘束より膨張ひずみが小さいこと、円筒管の端部においても膨張クラックが観察されなかったこと、ならびに無筋円筒管においてもケミカルプレス効果が測定されたことなどから、形状拘束（自己拘束）なるものが存在し、膨張コンクリートに対して多軸拘束となる。
- ② 円筒型の場合も二軸拘束の場合と同様、腹筋（軸筋）の主筋（円周筋）の膨張に及ぼす影響は顕著ではない。
- ③ 円筒型の膨張に対して、鉄筋比 2 % の場合、本理論式によって精度よい近似値が計算された。一方、多軸拘束においてある値以下の鉄筋比の場合、膨張については二軸拘束の場合と同様鉄筋比の関数である膨張抑制係数の導入が必要であると考えられ、また強度性状については最適鉄筋比が存在すると予想される。
- ④ 多軸拘束下における膨張コンクリートの効果は i) ケミカルプレストレス、

ii) ケミカルプレス効果の 2 つがある。同一配合においては膨張エネルギーは一定であるとするならば、一軸拘束における効果と多軸拘束における効果は等しいと考えられる。本試験では腹 / 主筋比 50 % の場合を除けば、多軸拘束での効果と一軸拘束でのケミカルプレストレスとの比は 1.11 ~ 1.28 であり、後者によって安全側かつ大差ない前者の値を推定できそうである。一方、腹 / 主筋比 50 % の場合、③で述べたごとく最適鉄筋比が存在するようであり、一軸拘束でのケミカルプレストレスの 2 倍強の効果が得られた。

第 6 章 参考文献

- 1) 矢野他 ; “ CSA を用いたコンクリートタンクの施工例 ”、コンクリートジャーナル、Vol.10、1972
- 2) 小笠原他 ; “ CPC パイプについて ”、セメントコンクリート、No.264
- 3) JIS A 5303
- 4) N.KH.Arutyunyan ; “ Some Problems in the Theory of Creep ”、Pergamon Press、1966
- 5) S.P.テイモシェンコ、北山他訳 ; “ 材料力学 (下) ”、コロナ社、1974
- 6) 辻 ; “ ケミカルプレストレスの推定方法について ”、セメント技術年報、XXVII、1973

表 6 - 1 円筒型試験体試験条件

試験項目	主鉄筋比	腹鉄筋比	実験材令	養生条件※
膨張試験	1 %	0.029 % 0.2 0.3 0.4 0.5		W W, S W W W
	2 %	0.029 0.4 0.6 0.8 1.0		W W, S W W W
外圧試験	1 %	0.2 0.3 0.4	14日、28日 14日 14日	W W W
	2 %	0.4 0.6 0.8	14日、28日 14日 14日	W W W
内圧試験	2 %	0.4 %	14日 28日 91日	W W, S W
無筋内圧試験			28日	W

※ W…湿布(散水)養生

S…14日間湿布以後気乾養生

表 6 - 2 円筒型円周方向膨張ひずみ測定値と計算値との比較

供試体記号	一軸拘束膨張 ひずみ計算値 $S(t) \times 10^{-6}$	測定値 (ϵ_{mea}) ($\times 10^{-6}$)	計算値 (ϵ_{cal}) ($\times 10^{-6}$)	$\frac{\epsilon_{mea}}{\epsilon_{cal}}$
CSA 1%-0.0%	1548	675	1332	0.51
CSA 2%-0.0%	636	430	480	0.90

表 6-3 テストピース試験結果

グループ名	σ_c (kg/cm ²)	σ_b (kg/cm ²)	σ_t (kg/cm ²)	E_c $\times 10^5$ (kg/cm ²)	ν
A	393	48.7	35.8	3.07	0.185
B	384	46.8	34.8	2.95	0.211
C	380	46.5	33.4	2.90	0.179
D	309	39.9	24.6	2.58	0.190
E	294	38.5	25.9	2.55	0.203
F	425	55.0	37.2	3.26	0.198
G	335	44.9	25.6	3.02	0.195

ここで、

Aグループ：CSA-1-0.2W-14、CSA-1-0.3W-14

Bグループ：CSA-1-0.4W-14、CSA-2-0.4W-14

Cグループ：CSA-2-0.6W-14、CSA-2-0.8W-14

Dグループ：P-1-0.2W-14、P-1-0.3W-14、P-1-0.4W-14

Eグループ：P-2-0.4W-14、P-2-0.6W-14、P-2-0.8W-14

Fグループ：CSA-1-0.2W28、CSA-2-0.4W28

Gグループ：P-1-0.2W28、P-2-0.4W28

表 6-4 円筒型円周方向膨張ひずみ

試験体記号	14日材令 ϵ_{se} ($\times 10^{-6}$)	28日材令 ϵ_{se} ($\times 10^{-6}$)
CSA-1-0.2	536	544
CSA-1-0.3	576	
CSA-1-0.4	548	
CSA-2-0.4	372	376
CSA-2-0.6	360	
CSA-2-0.8	416	

※ 円周方向(主筋)膨張ひずみ(埋め込み
ゲージ60cm位置)

表 6 - 5 円筒型外圧試験結果

試験体記号	ひびわれ発生荷重 (t)	弾性係数比 (n)	換算断面二次モーメント (cm ⁴)	ひびわれ発生応力 (kg/cm ²)	破壊荷重 (t)
CSA-I-02 W-14	14.11	6.84	16794	55.5	43.5
CSA-I-03 W-14	14.77	"	"	58.0	42.5
CSA-I-04 W-14	13.80	7.12	16819	54.3	42.1
CSA-2-04 W-14	17.97	"	17274	64.0	55.3
CSA-2-06 W-14	18.70	7.24	17296	66.4	56.0
CSA-2-08 W-14	19.26	"	"	68.4	56.7
P - I-02 W-14	9.08	8.14	16911	36.5	43.9
P - I-03 W-14	9.36	"	"	37.5	44.1
P - I-04 W-14	9.78	"	"	39.1	44.5
P - 2-04 W-14	9.74	8.24	17472	35.5	53.5
P - 2-06 W-14	9.56	"	"	34.9	52.2
P - 2-08 W-14	10.09	"	"	36.7	51.7
CSA-I-02 W-28	18.21	6.44	16758	71.0	53.6
CSA-2-04 W-28	22.44	"	15154	79.8	53.6
P - I-02 W-28	9.73	6.95	16804	36.4	41.8
P - 2-04 W-28	11.91	"	17244	47.2	43.6

表 6-6 円筒型外圧試験におけるケミカルプレストレス

供試体記号	ϵ_{se} ($\times 10^{-6}$)	σ_{cp} (kg/cm^2)	P_e ※ (t)	σ_{cpe} (kg/cm^2)	σ_{cr-CSA} (kg/cm^2)	σ_{cr-P} (kg/cm^2)
CSA-1-0.2 W-14	536	11.3	2.79	10.4	55.5	36.5
CSA-1-0.3 W-14	576	12.1	2.48	9.2	58.0	37.5
CSA-1-0.4 W-14	548	11.5	2.81	10.5	54.3	39.1
CSA-2-0.4 W-14	372	15.6	4.33	14.8	64.0	35.5
CSA-2-0.6 W-14	360	15.1	4.49	15.3	66.4	34.9
CSA-2-0.8 W-14	416	17.5	4.68	16.0	68.4	36.7
CSA-1-0.2 W-28	544	11.4	3.05	11.4	71.0	36.4
CSA-2-0.4 W-28	376	15.8	4.83	16.6	79.8	47.2

※処女引張鉄筋ひずみと再載荷時の曲線との平行部分の荷重

表 6-7 円筒型外圧試験におけるケミカルプレストレス、ケミカルプレス

供試体記号	$\frac{\sigma_{cpe}}{\sigma_{cp}}$	$\sigma_{cr-CSA} -$ ($\sigma_{cr-P} + \sigma_{cpe}$)	$\sigma_{cr-CSA} -$ ($\sigma_{cr-P} + \sigma_{cp}$)
CSA-1-0.2 W-14	0.92	8.61	7.74
CSA-1-0.3 W-14	0.77	11.20	8.34
CSA-1-0.4 W-14	0.91	4.73	3.69
CSA-2-0.4 W-14	0.95	13.72	12.89
CSA-2-0.6 W-14	1.01	16.21	16.41
CSA-2-0.8 W-14	0.92	15.70	14.20
CSA-1-0.2 W-28	1.00	23.20	23.16
CSA-2-0.4 W-28	1.05	16.02	16.83

表 6-8 プレーンにおける円筒型(外圧)ひびわれ強度とテストピース曲げ強度との比較

試験体記号	$\frac{\sigma_{crp}}{\sigma_b}$
P-1-0.2 W-14	0.91
P-1-0.3 W-14	0.94
P-1-0.4 W-14	0.98
P-2-0.4 W-14	0.92
P-2-0.6 W-14	0.91
P-2-0.8 W-14	0.95
P-1-0.2 W-28	0.81
P-2-0.4 W-28	1.05

表 6-9 円筒型円周方向膨張ひずみ

試験体記号	14日材令 ϵ_{se} ($\times 10^{-6}$)	28日材令 ϵ_{se} ($\times 10^{-6}$)	91日材令 ϵ_{se} ($\times 10^{-6}$)
CSA-2-0.4 w	372	376	366
CSA-2-0.4 s	—	265	—

表 6-10 円筒型内圧試験結果

供試体記号	ひびわれ 発生水圧 (kg/cm^2)	ひびわれ発 生応力 σ_{cr} (kg/cm^2)	テストピース				ν
			σ_c (kg/cm^2)	E_c $\times 10^5$ (kg/cm^2)	σ_b (kg/cm^2)	σ_t (kg/cm^2)	
CSA-2-04 W-14	19.5	57.7	448	3.37	68.0	41.6	0.190
P-2-04 W-14	8.2	24.3	306	2.60	40.0	26.4	0.199
CSA-2-04 W-28	20.0	59.2	473	3.37	53.6	38.2	0.179
P-2-04 W-28	10.5	31.1	356	2.92	45.6	27.5	0.183
CSA-2-04 S-28	17.5	51.8	437	3.15	59.7	40.3	0.201
P-2-04 S-28	10.0	29.6	363	2.75	43.2	26.4	0.191
CSA-2-04 W-91	18.6	55.1	489	3.43	53.7	40.1	0.182
P-2-04 W-91	12.0	35.5	402	2.97	52.6	34.7	0.179
CSA 無筋 W-28	8.6	25.4	471	3.28	59.4	36.8	0.202
P 無筋 W-28	7.4	21.9	349	2.83	43.2	28.4	0.178

表6-11 円筒型内圧試験における
ケミカルプレストレス、ケミカルプレス

供試体記号	σ_{CP} (kg/cm ²)	$\sigma_{Cr-CSA-}$ ($\sigma_{Cr-p} + \sigma_{cp}$)
CSA-2-0.4 w-14	15.6	17.8
CSA-2-0.4 w-28	15.8	12.3
CSA-2-0.4 s-28	11.1	11.1
CSA-2-0.4 w-91	15.4	4.2

表6-12 プレーンにおける
円筒型(内圧)ひびわれ強度
とテストピース割裂強度

試験体記号	$\frac{\sigma_{tc}}{\sigma_t}$
P-1-0.2 w-14	0.75
P-2-0.4 w-14	0.79
P-1-0.2 w-28	0.90
P-2-0.4 w-28	0.99
P-2-0.4 s-28	0.97
P-2-0.4 w-91	0.90
P 無筋 w-28	No. 1 0.78 No. 2 0.76

ここで、有筋のものについては

$$\sigma_{tc} = \frac{\sigma_{cr}}{(1+n\rho)}$$

表6-13 一軸拘束下のケミカルプレストレスと多軸拘束下の
ケミカルプレストレス、ケミカルプレスとの比較

鉄筋比 (%)	σ_{cp-u} (kg/cm ²)	σ_{cp-m} (kg/cm ²)	σ_p (kg/cm ²)	$\frac{(\sigma_{cp-m} + \sigma_p)}{\sigma_{cp-u}}$	試験種類
0.286	34.5 [*]	6.4	32.9	1.14	二軸拘束 腹/主筋比10%腹筋方向
0.476	33.6 [*]	9.2	32.8	1.25	二軸拘束 腹/主筋比20%腹筋方向
0.95	31.7	—	—	—	一軸拘束
1.0	31.0 [*]	11.4	23.2	1.12	円筒型 円周方向
1.183	30.0 [*]	21.5	48.5	2.33	二軸拘束 腹/主筋比50%腹筋方向
1.52	25.9	—	—	—	一軸拘束
2.0	25.4 [*]	15.8	外圧 16.8 内圧 12.3	1.28 1.11	円筒型 円周方向
2.12	26.9	—	—	—	一軸拘束

(材令28日)

※…計算値

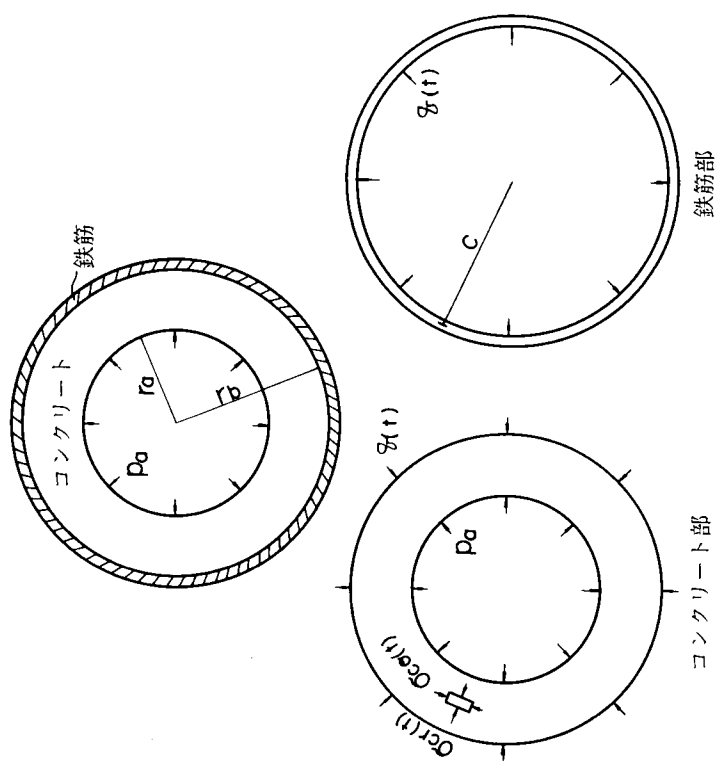


図 6-1 円筒型膨張機構概念

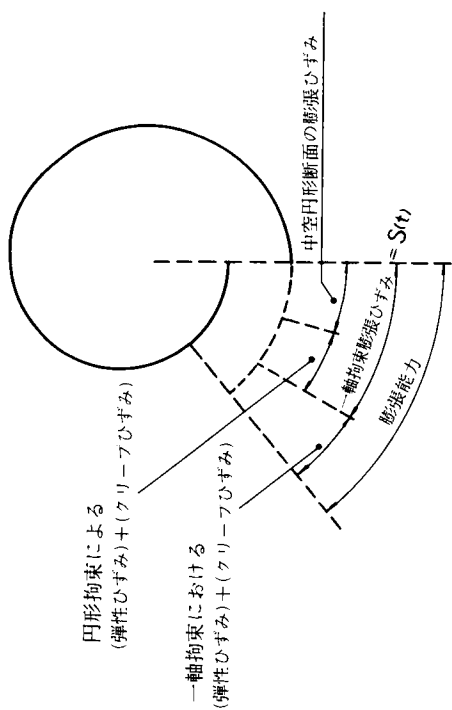


図 6-2 円筒型膨張概念

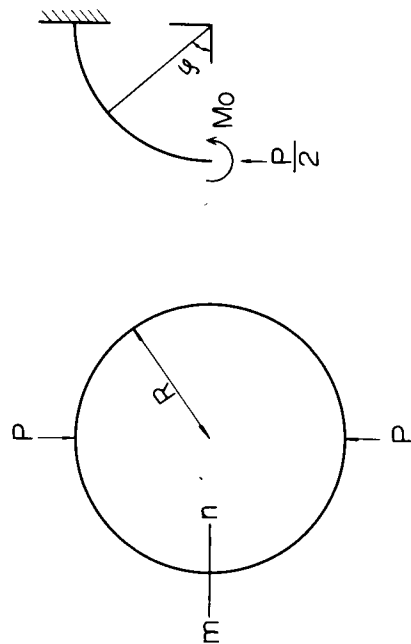


図 6-3 外圧応力計算方法

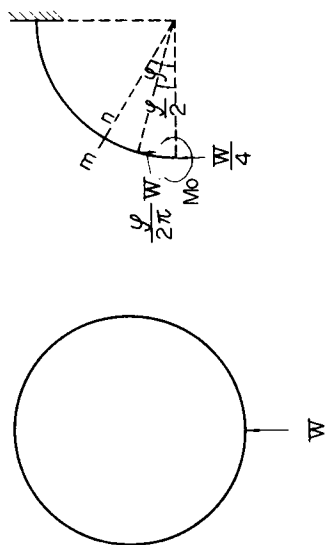


図 6-4 自重による応力計算方法 (上部断面)

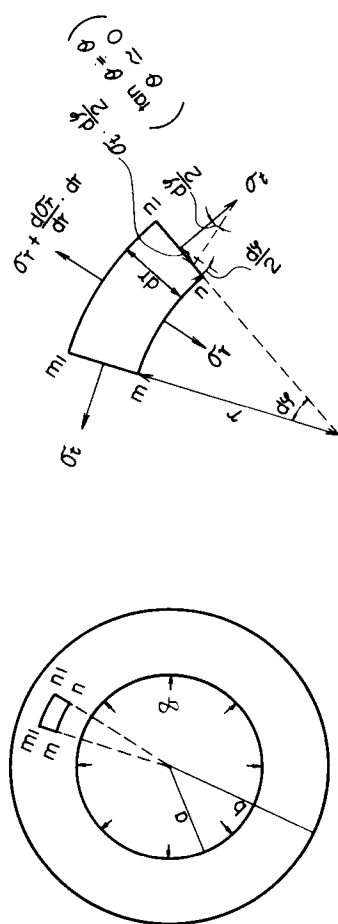


図 6-5 自重による応力計算方法 (下部断面)

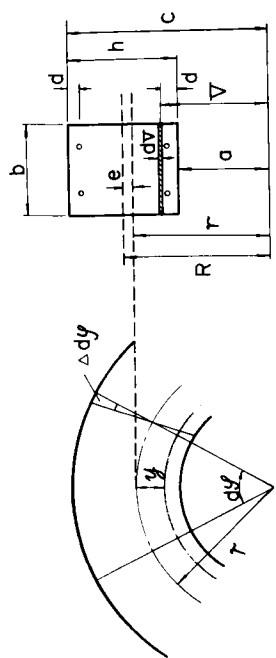


図 6-6 鉄筋コンクリート曲りはりの解析方法

図 6-7 内圧応力計算方法

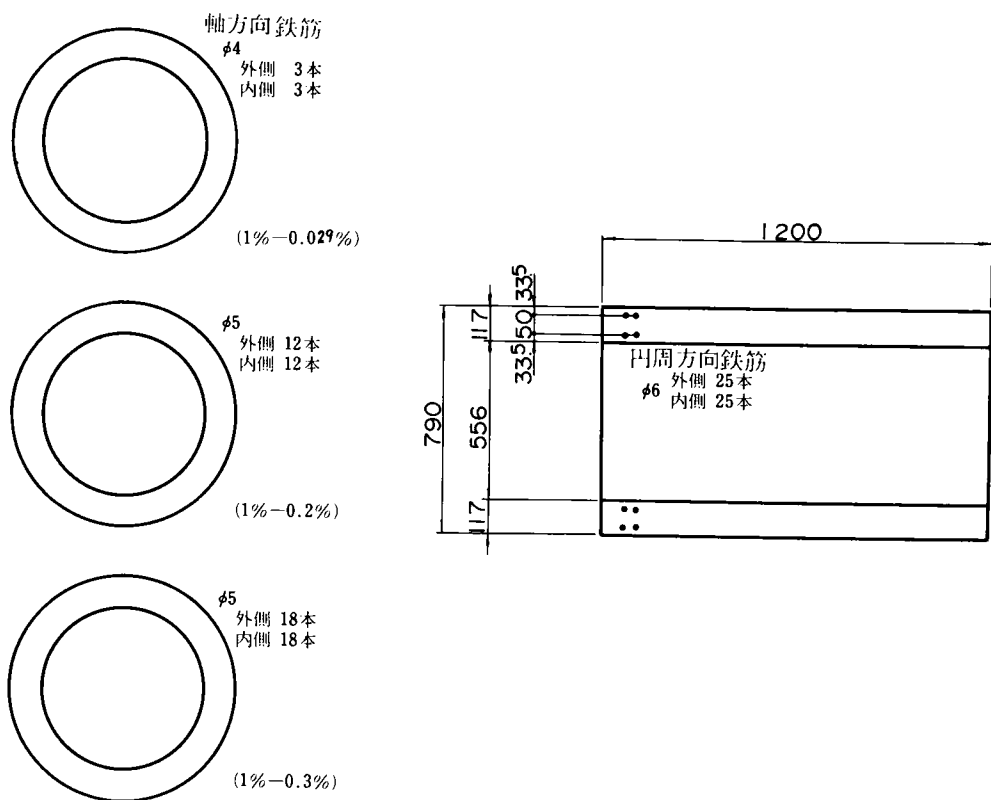


図 6-8 円筒型試験体略図 (主筋1%)

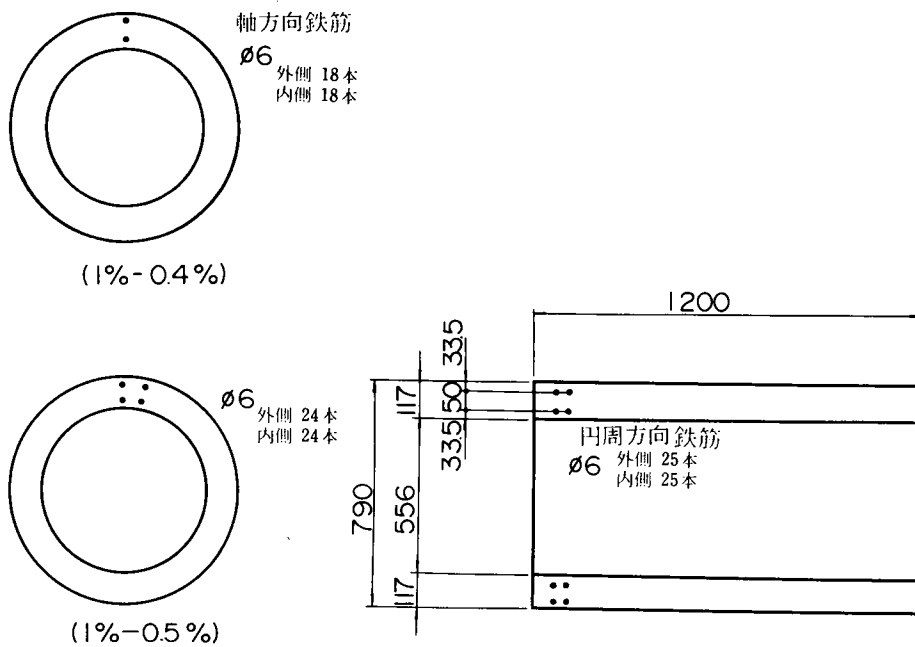


図 6-9 円筒型試験体略図 (主筋1%)

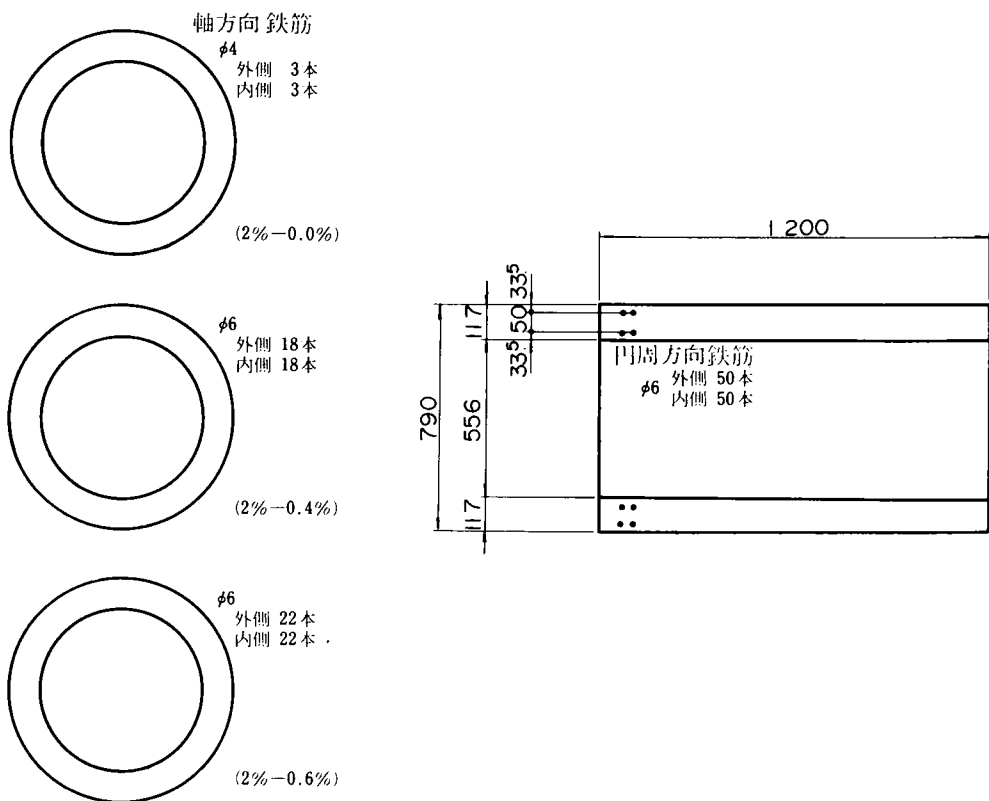


図6-10 円筒型試験体略図(主筋2%)

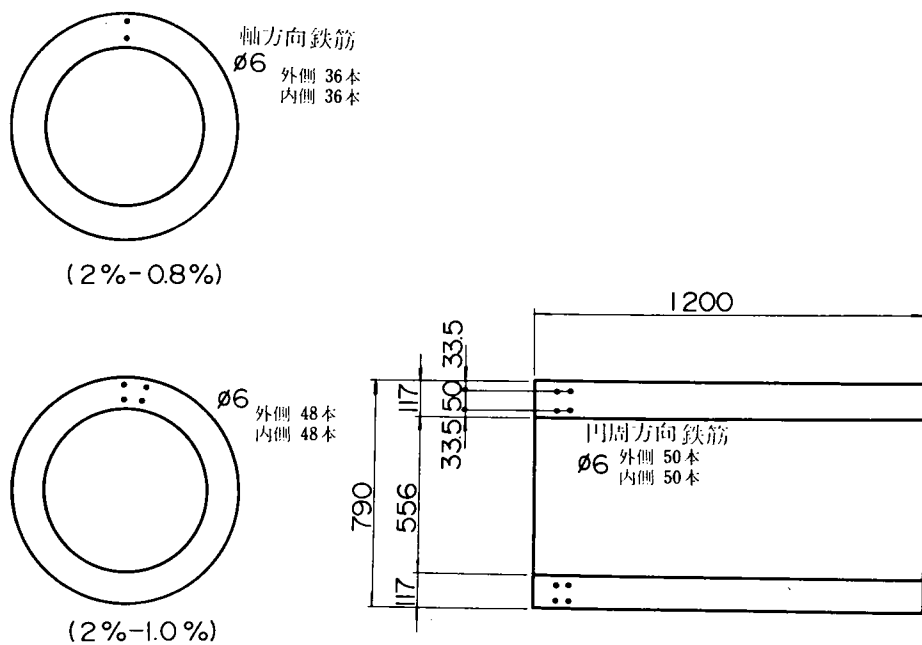
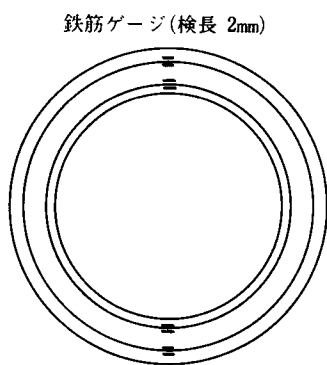
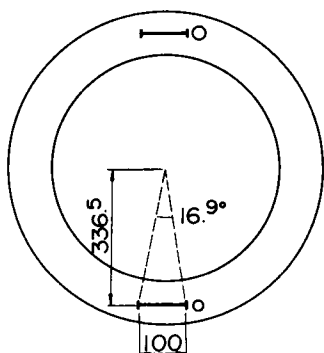


図6-11 円筒型試験体略図(主筋2%)



カールソン型ひずみ計(検長10cm)



膨張測定用ゲージセット位置

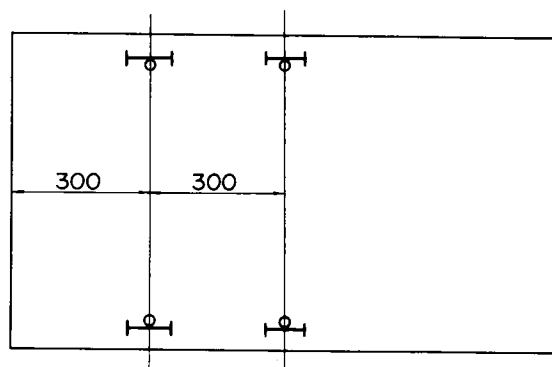
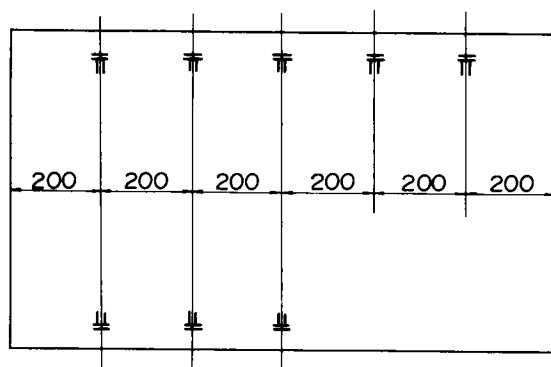
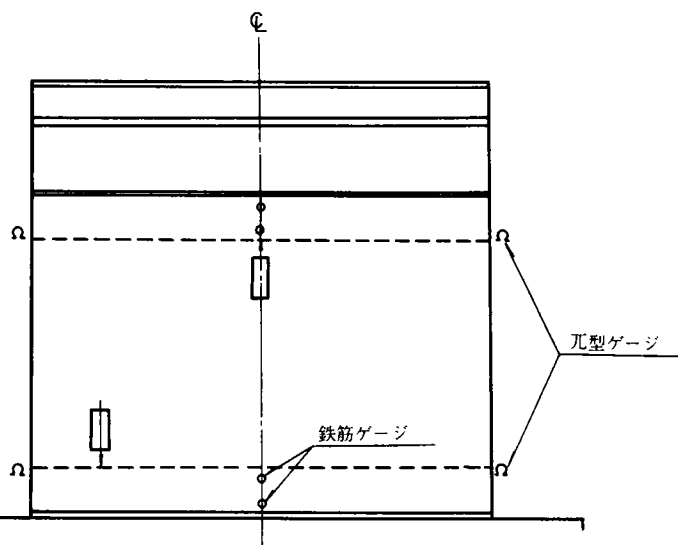
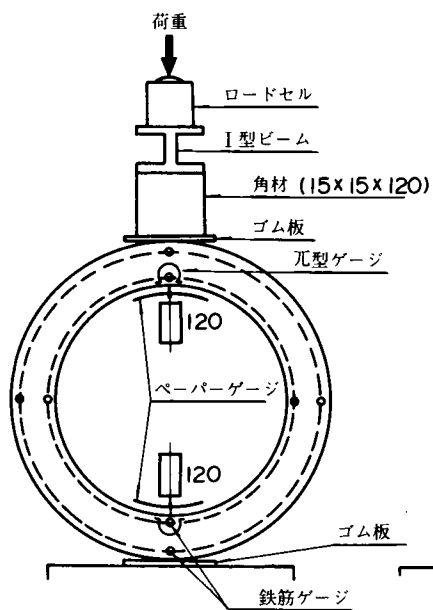


図 6-12 円筒型膨張ひずみ測定用試験体略図




- 注)
- 1)  : 変位計
 - 2) ペーパーゲージの添字は、ゲージ長を示す。
 - 3) ペーパーゲージ及び鉄筋ゲージ位置は、すべて、中央に配置した。

図 6-13 外圧試験略図

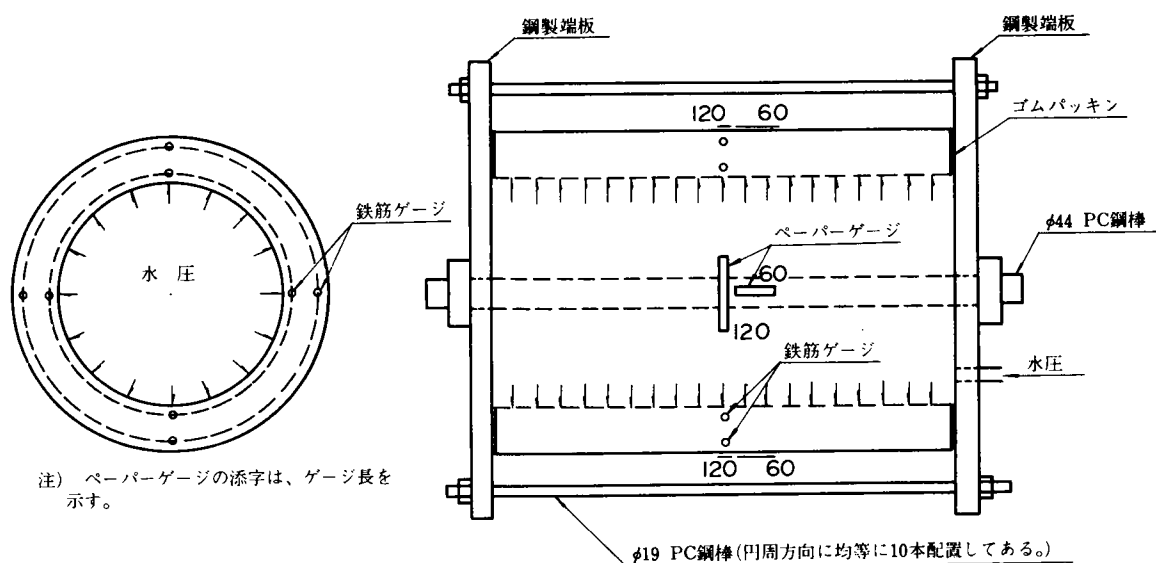


図 6-14 内圧試験略図

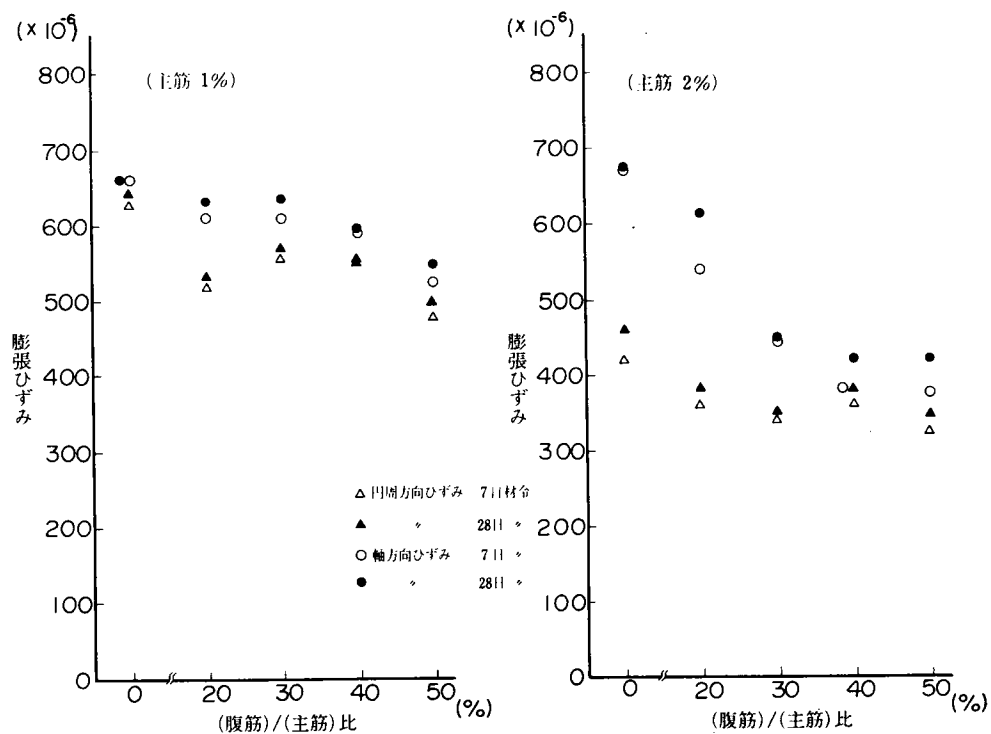


図 6-15 円筒型膨張ひずみ～(腹筋)/(主筋)比

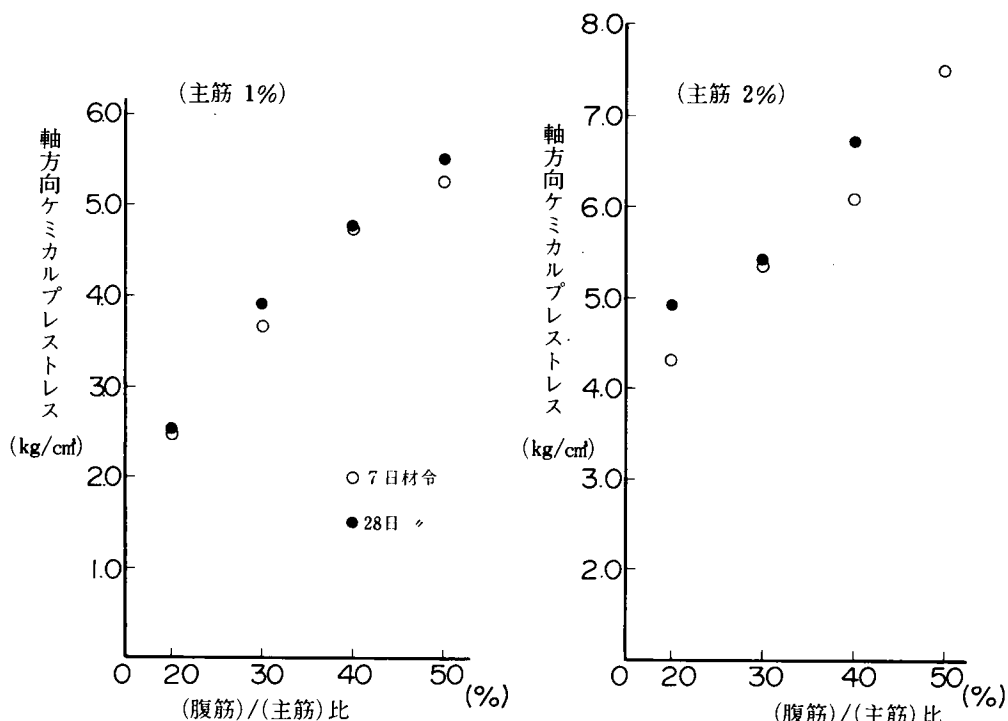


図6-16 円筒型軸方向ケミカルプレストレス～(腹筋)/(主筋)比

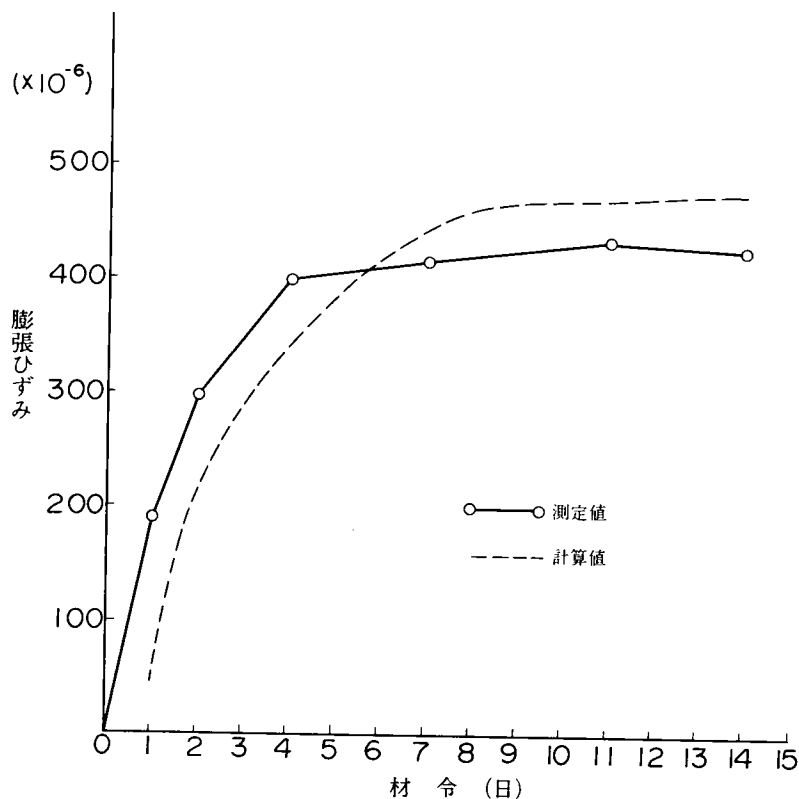


図6-17 円筒型膨張ひずみの測定値と計算値との比較 (主鉄筋比2%)

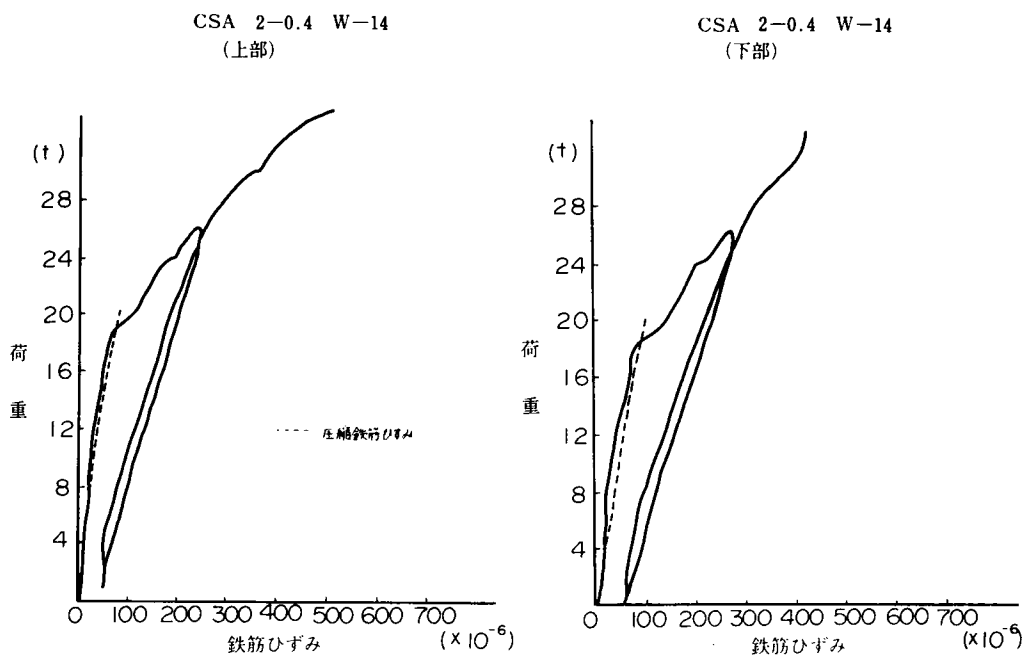


図6-18 円筒型外圧荷重～引張鉄筋ひずみ

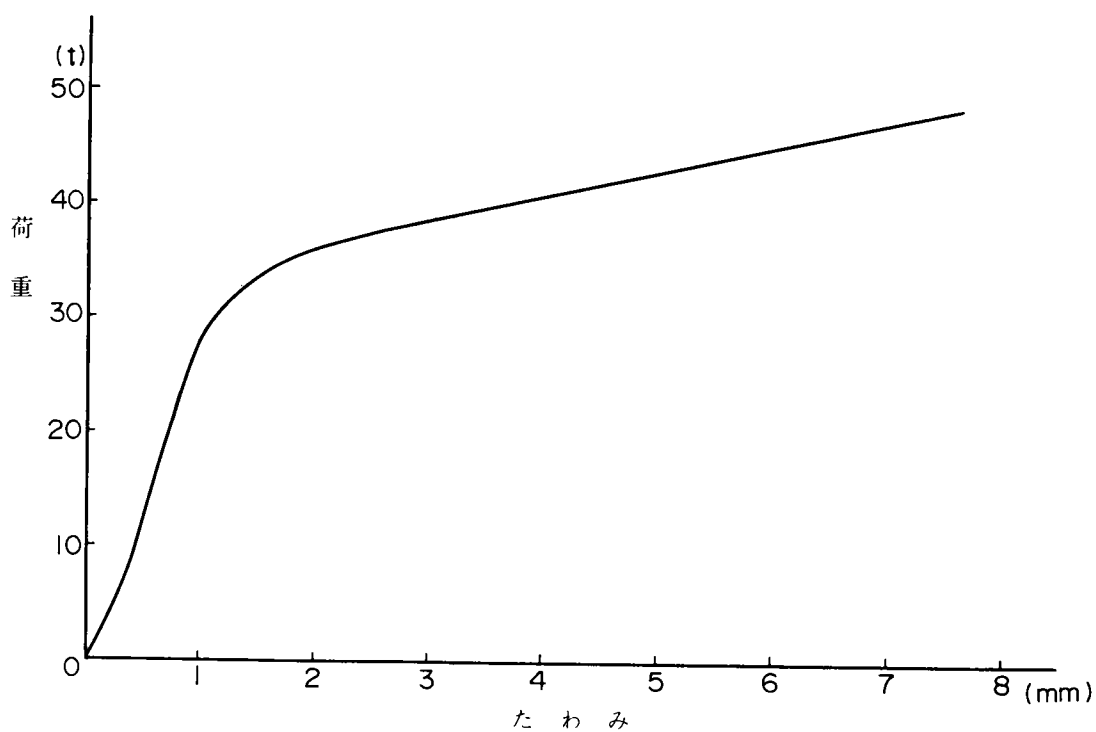


図6-19 円筒型外圧 荷重～たわみ (CSA-2-0.4 W-14)

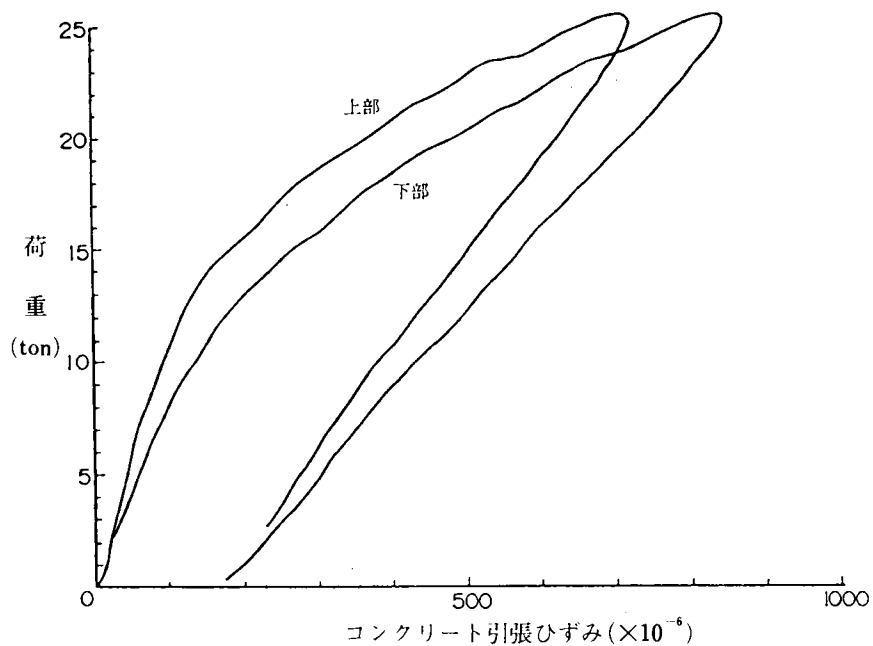


図 6-20 円筒型外圧 荷重～コンクリート引張ひずみ (CSA-2-0.4 W-14)

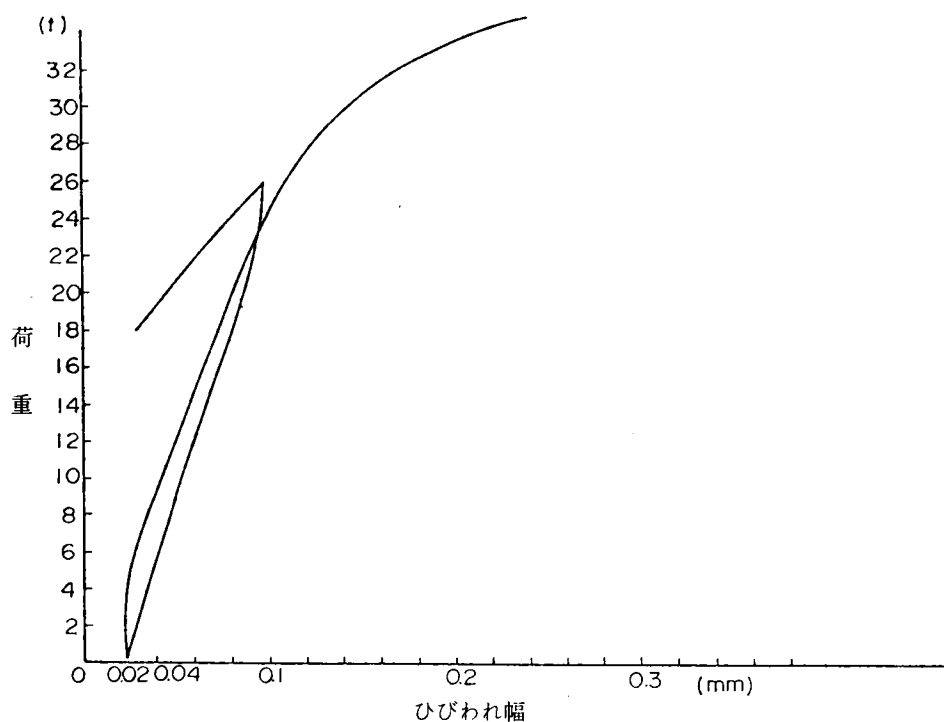


図 6-21 円筒型外圧 荷重～ひびわれ幅 (CSA-2-0.4 W-14)

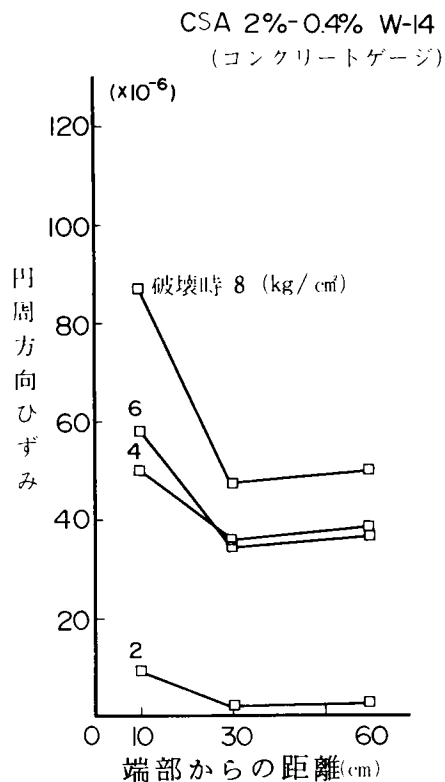
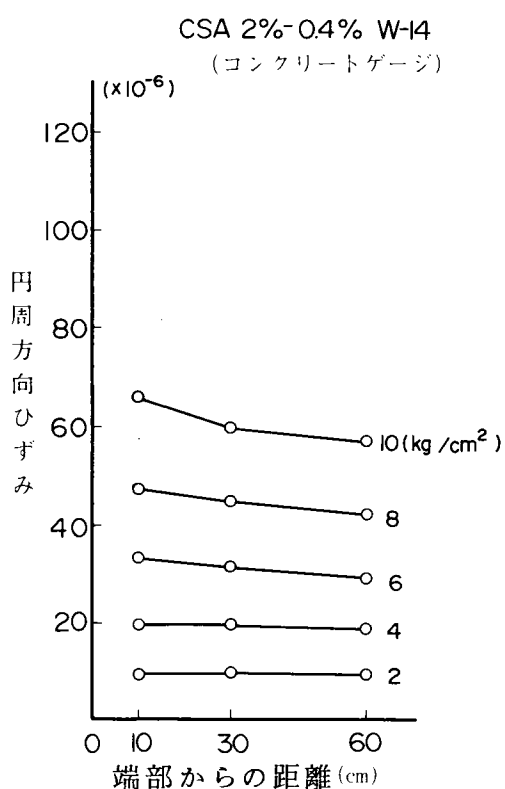


図 6-22 円筒型内圧 コンクリート 円周方向ひずみ～端部からの距離

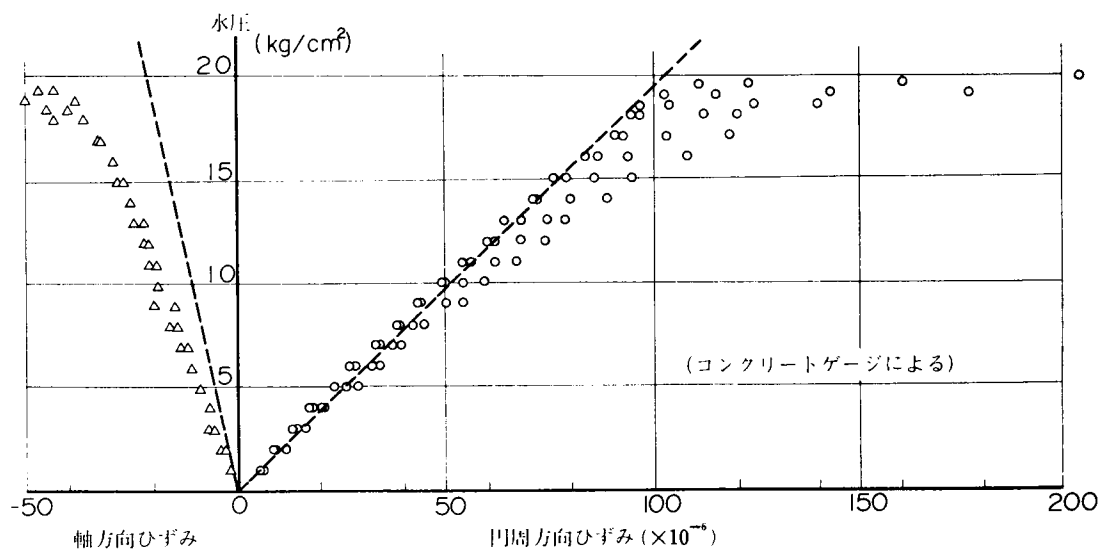


図 6-23 円筒型内圧水圧～コンクリートひずみ (CSA-2-0.4 W-14)

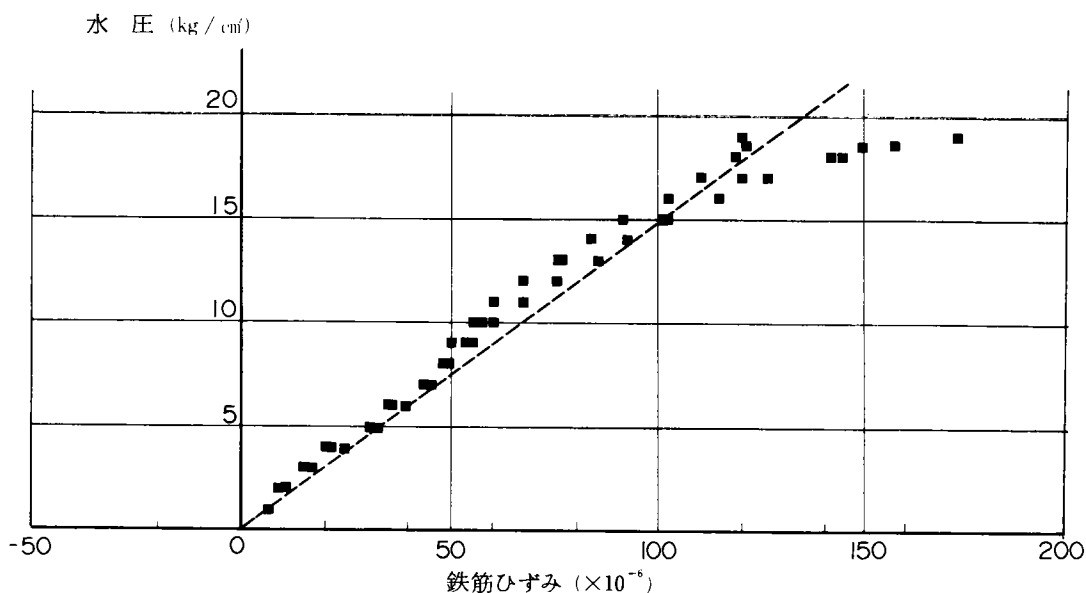


図 6-24 円筒型内圧水圧～内側鉄筋ひずみ (CSA-2-0.4 W-14)

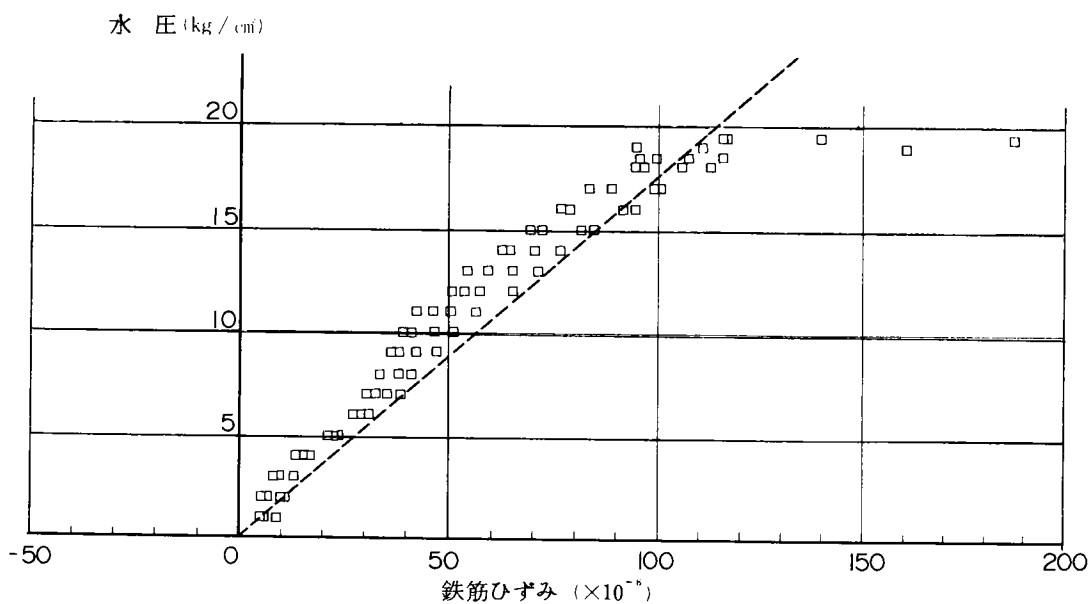
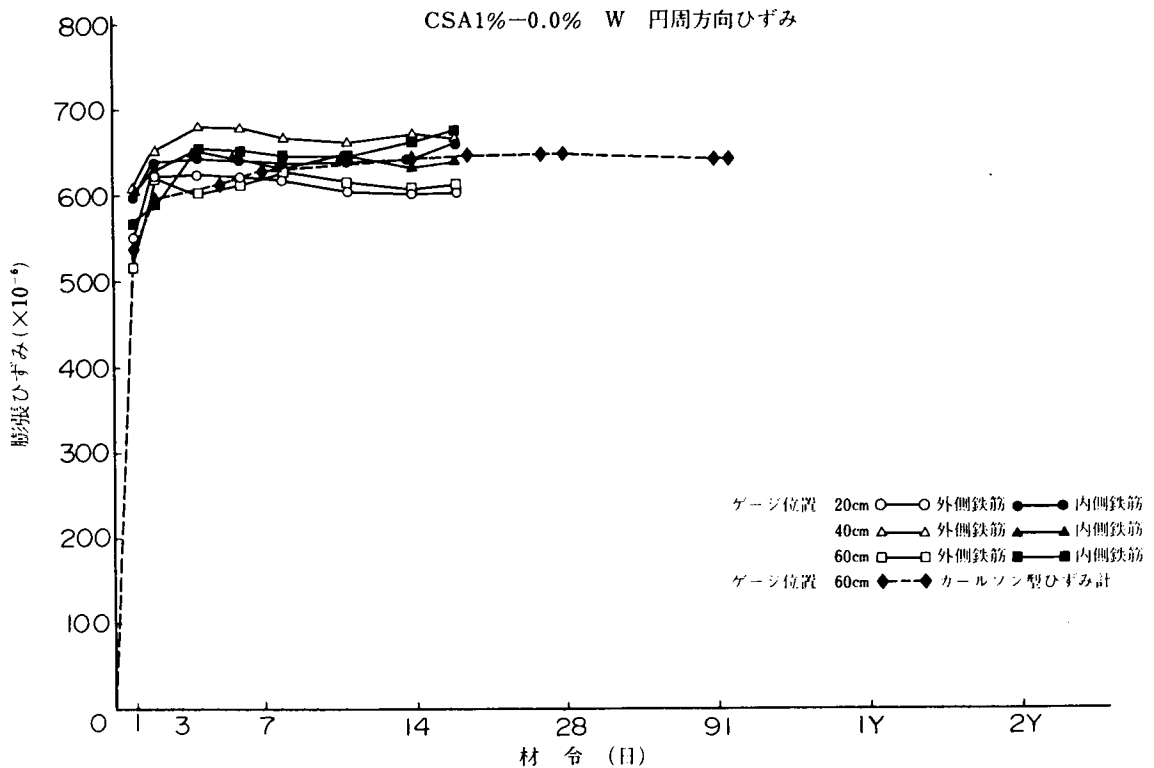
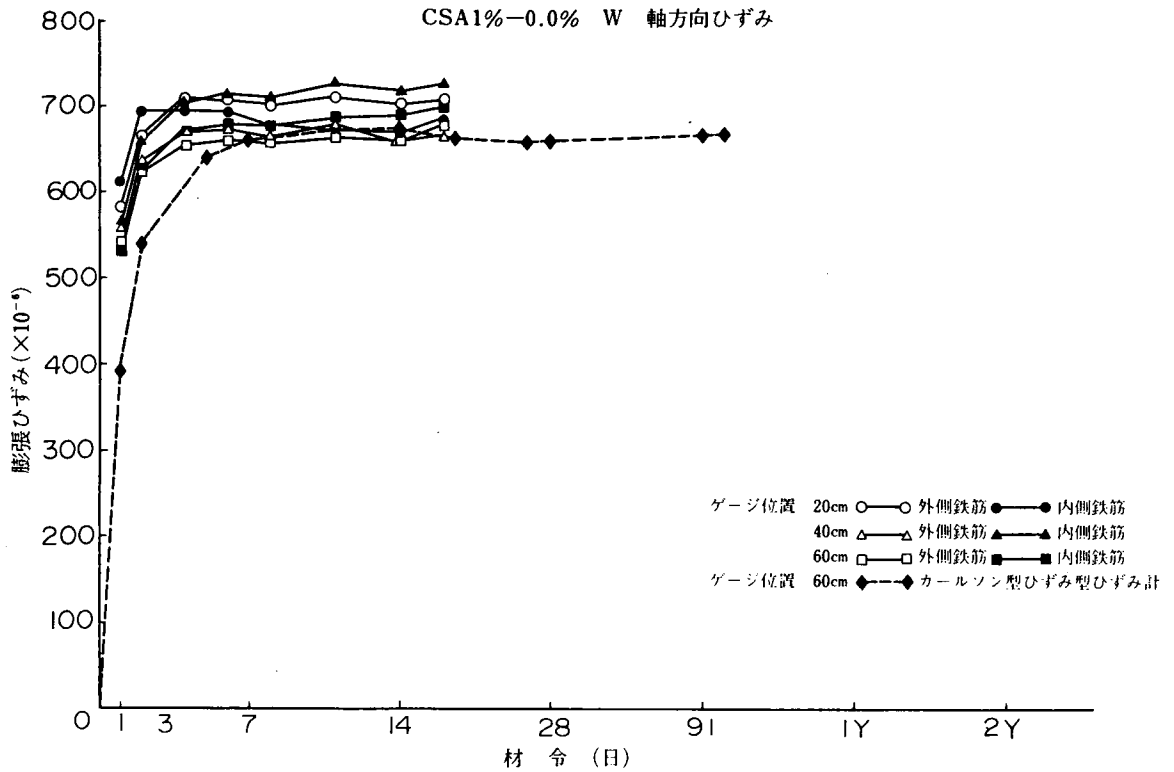
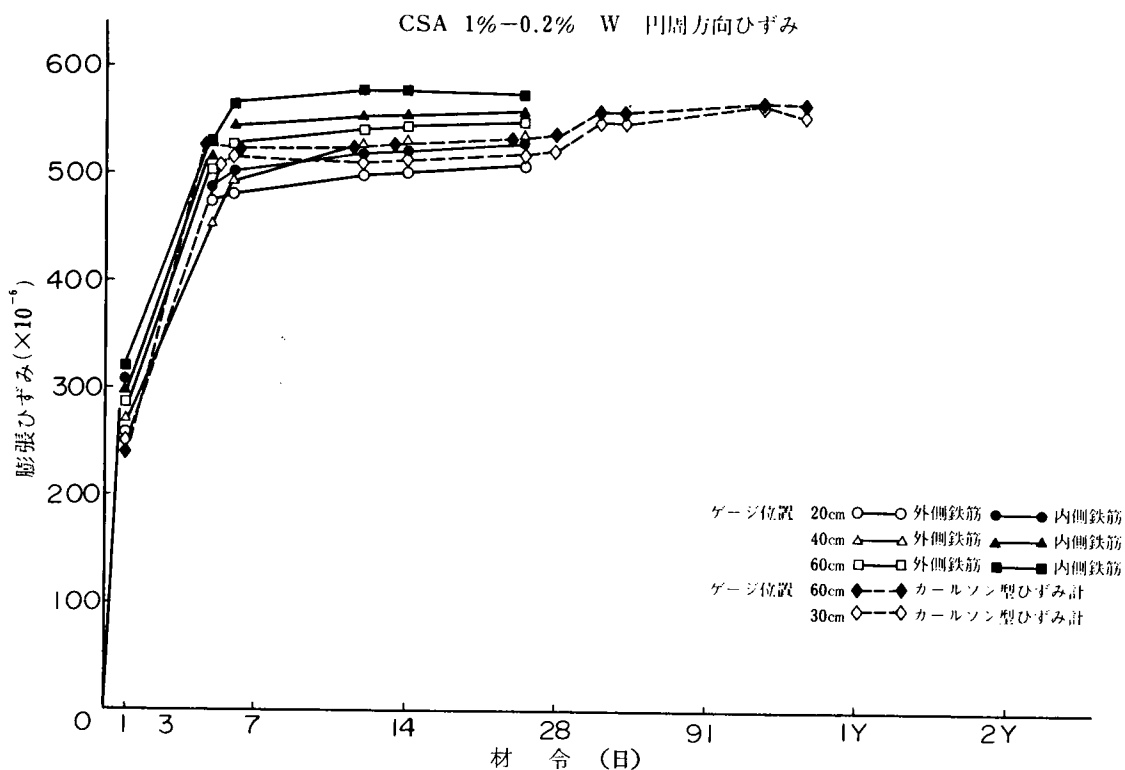
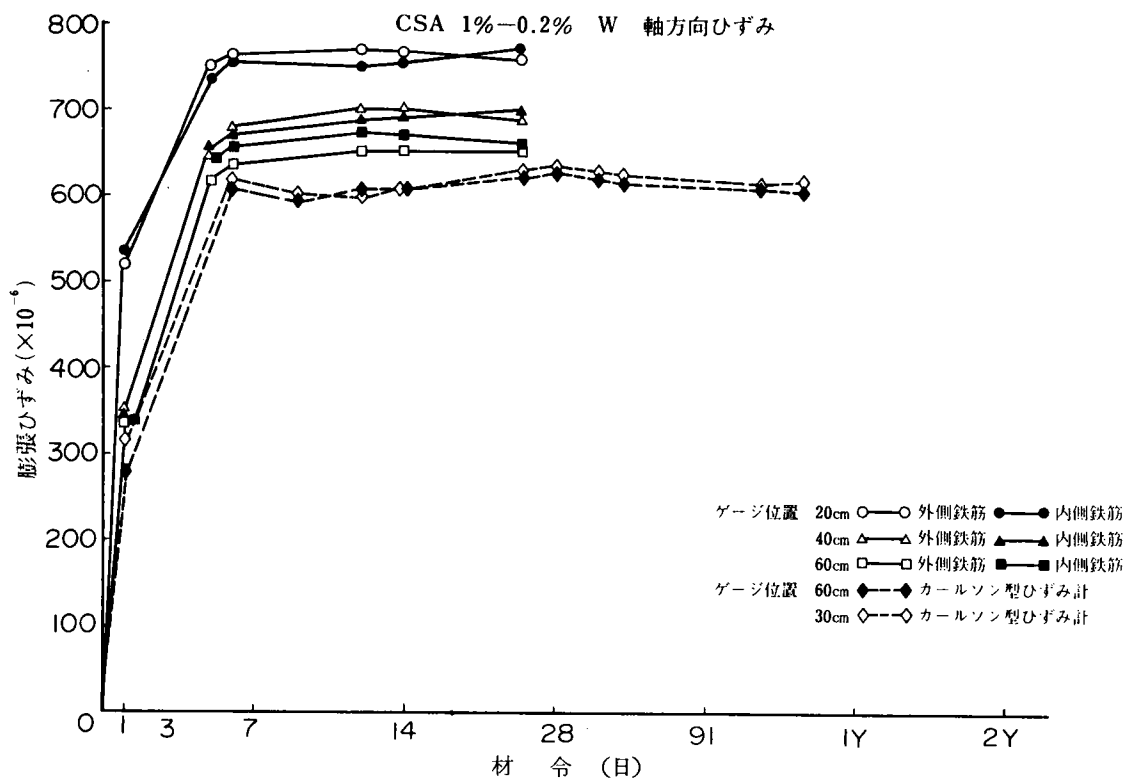


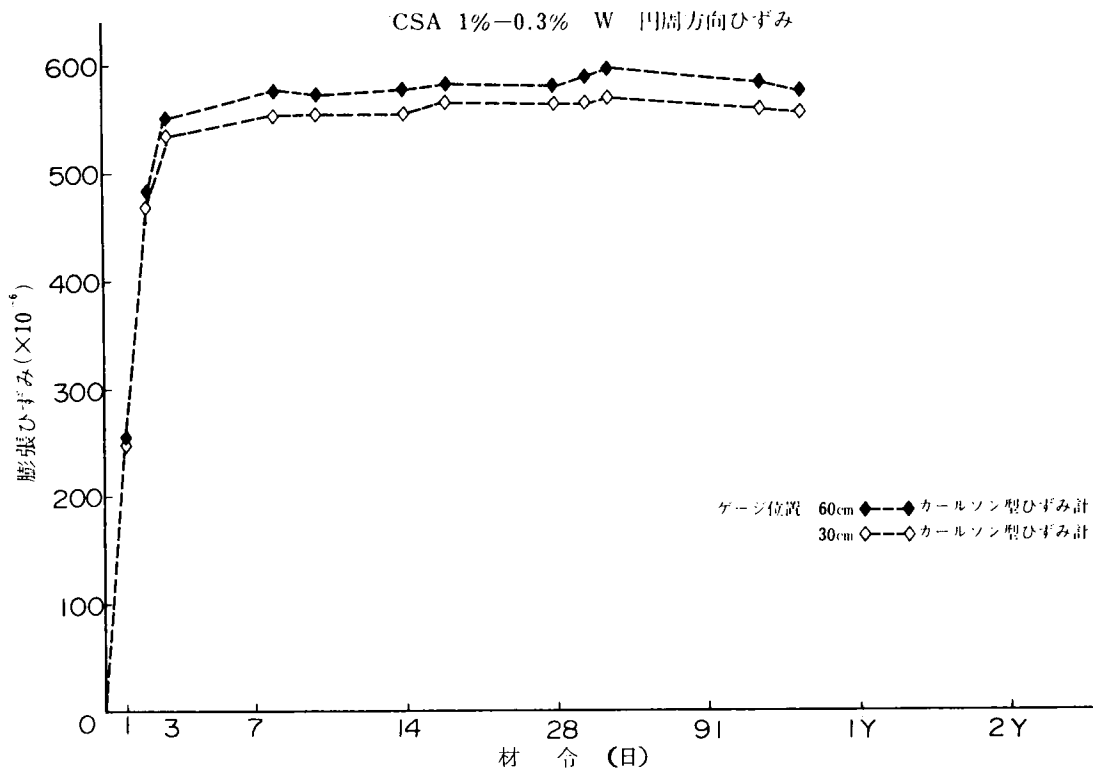
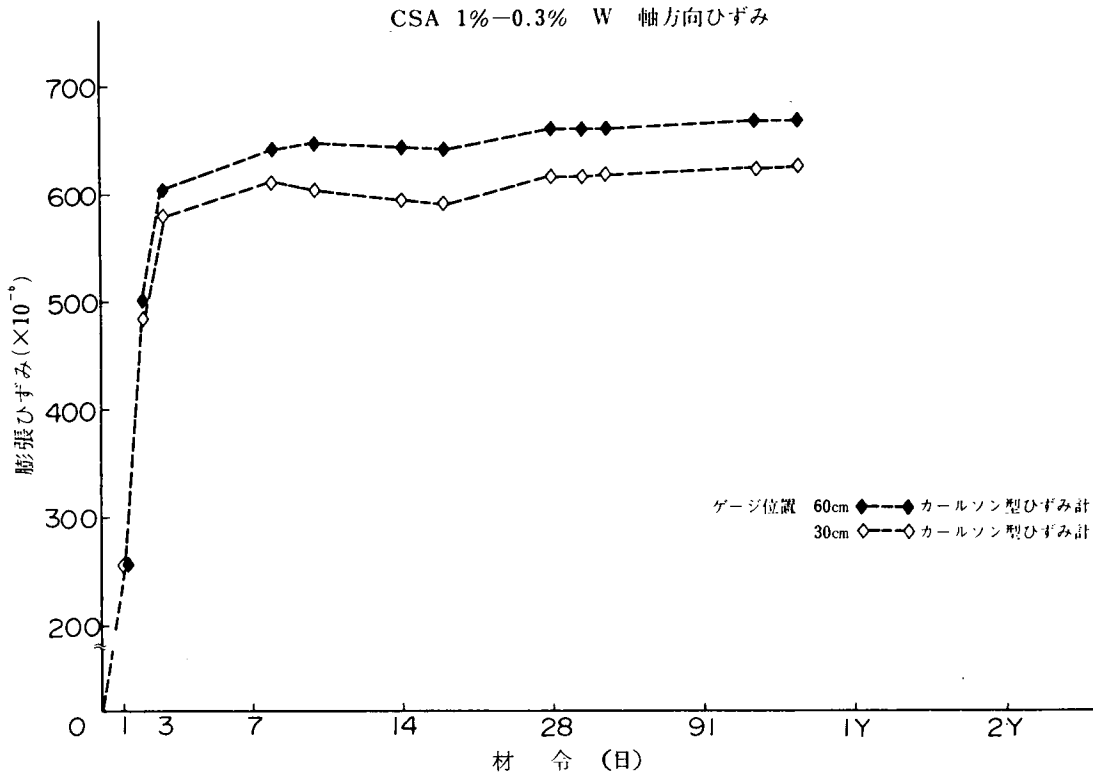
図 6-25 円筒型内圧水圧～外側鉄筋ひずみ (CSA-2-0.4 W-14)



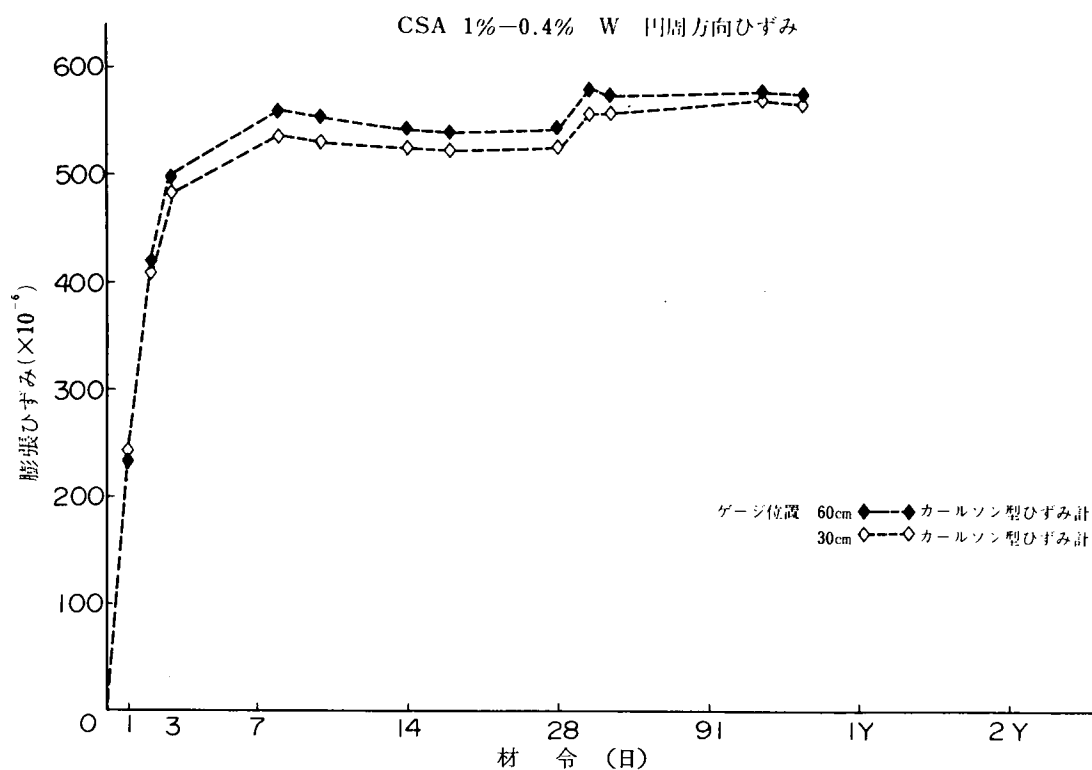
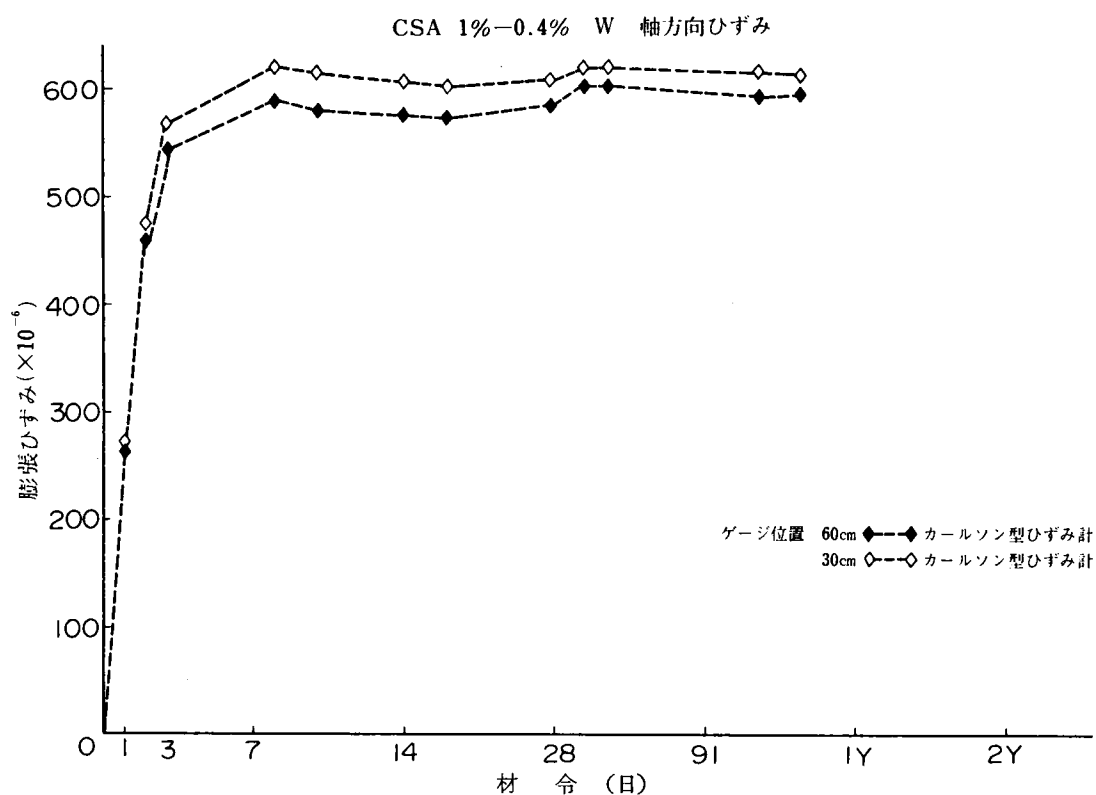
付図6-1 円筒型膨張ひずみ測定結果



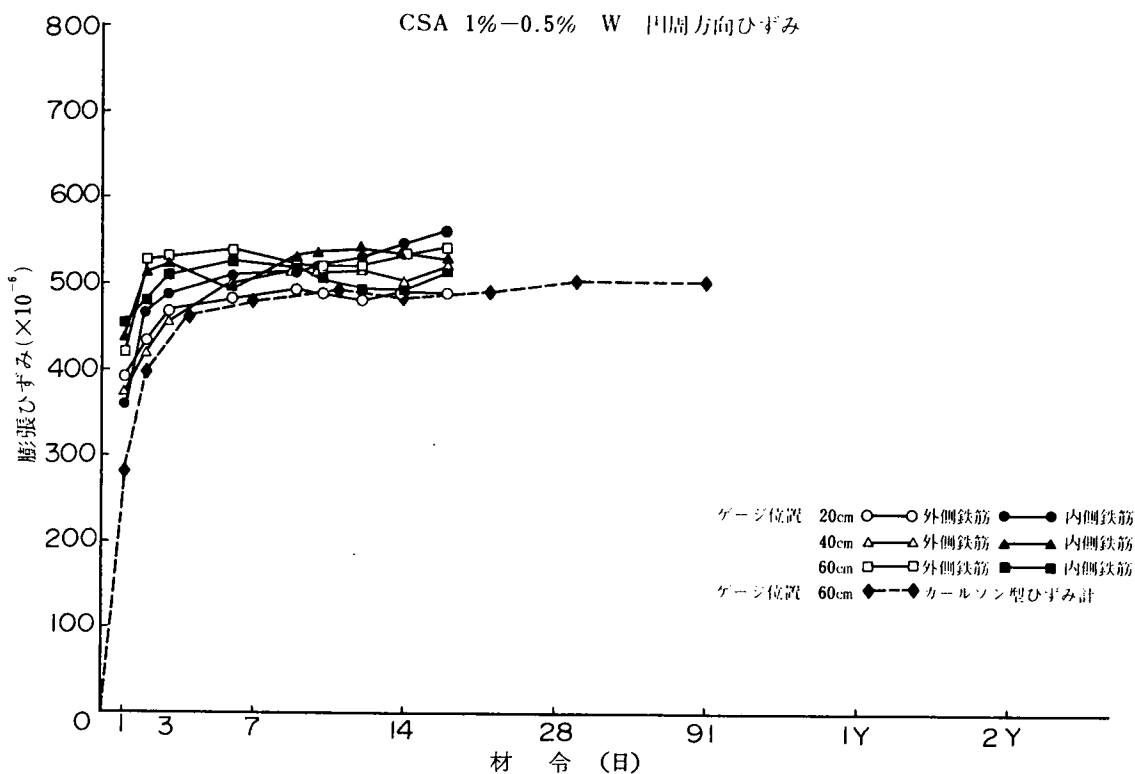
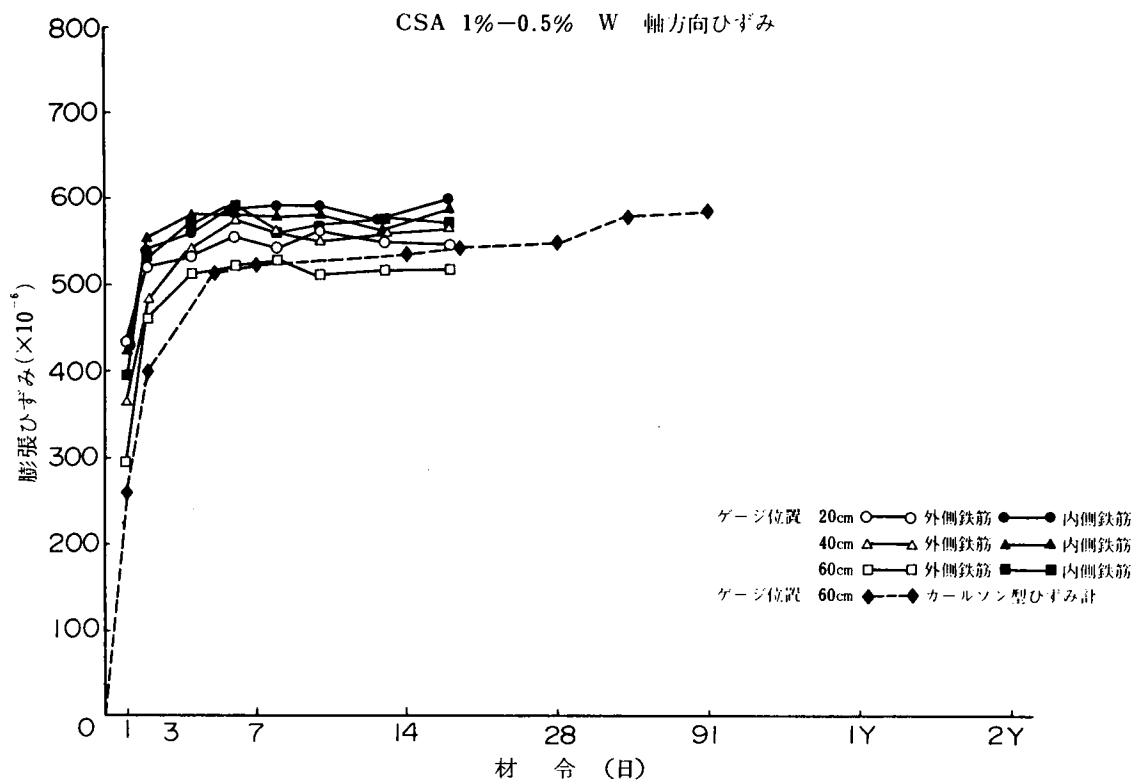
付図 6-2 円筒型膨張ひずみ測定結果



付図 6-3 円筒型膨張ひずみ測定結果

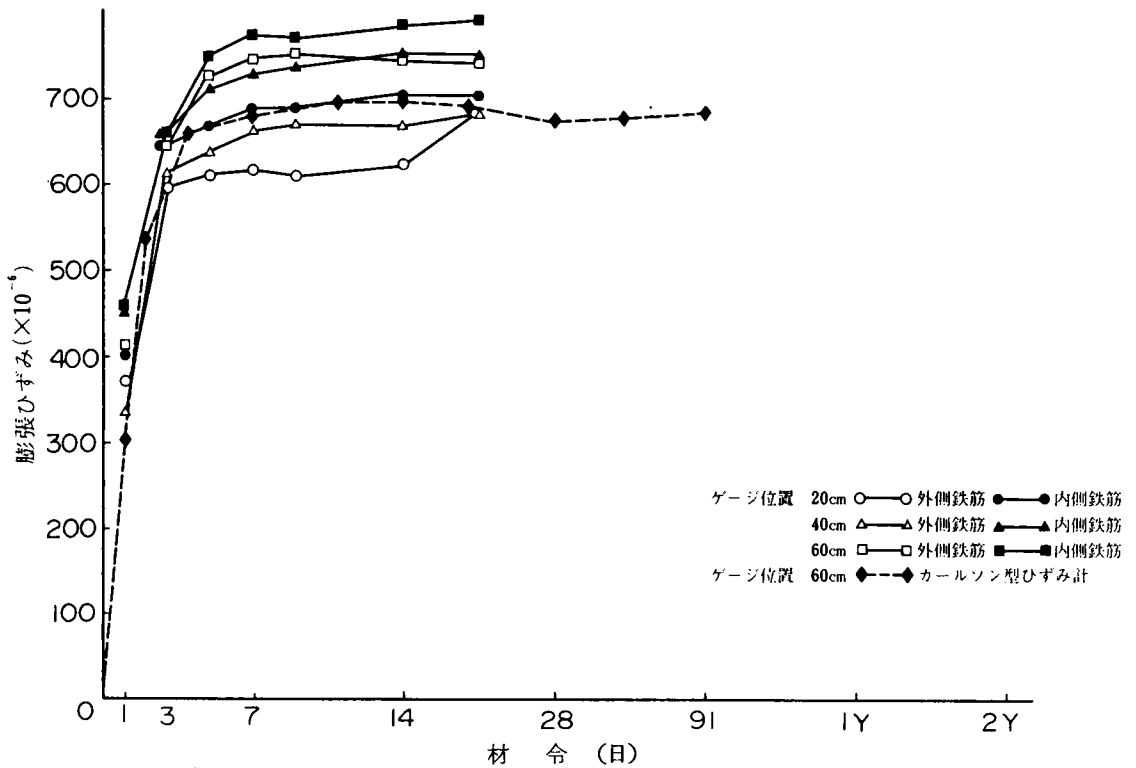


付図 6-4 円筒型膨張ひずみ測定結果

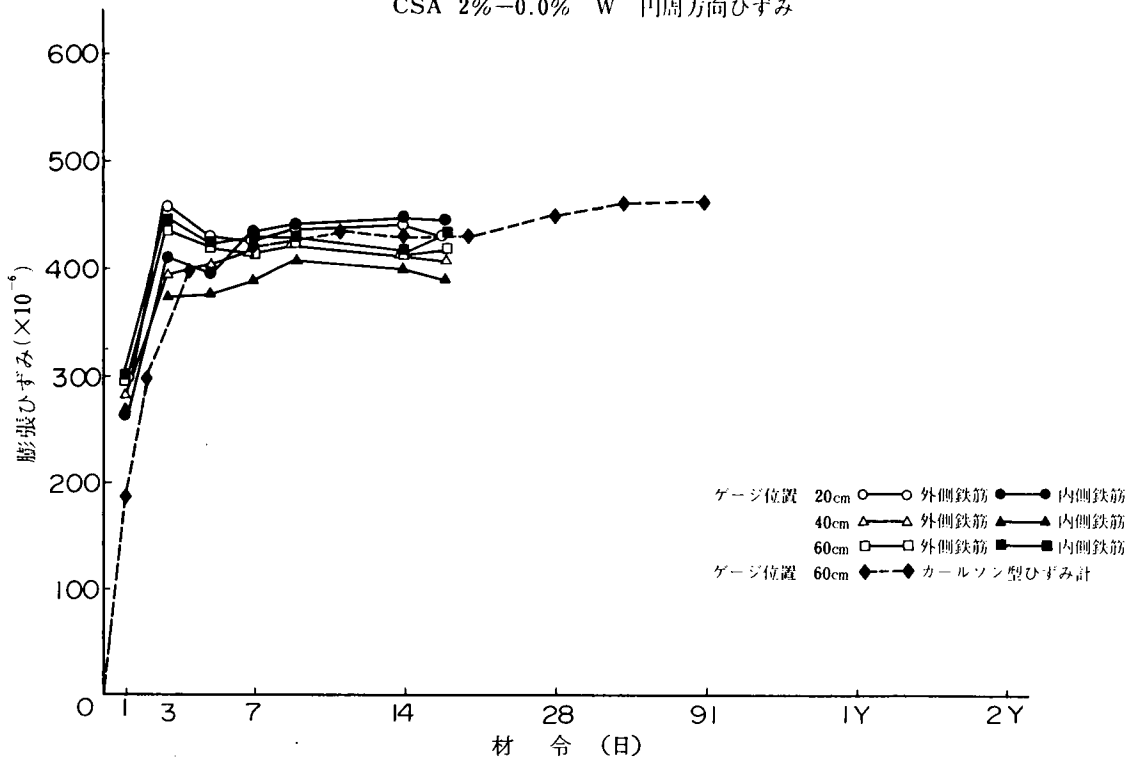


付図 6-5 円筒型膨張ひずみ測定結果

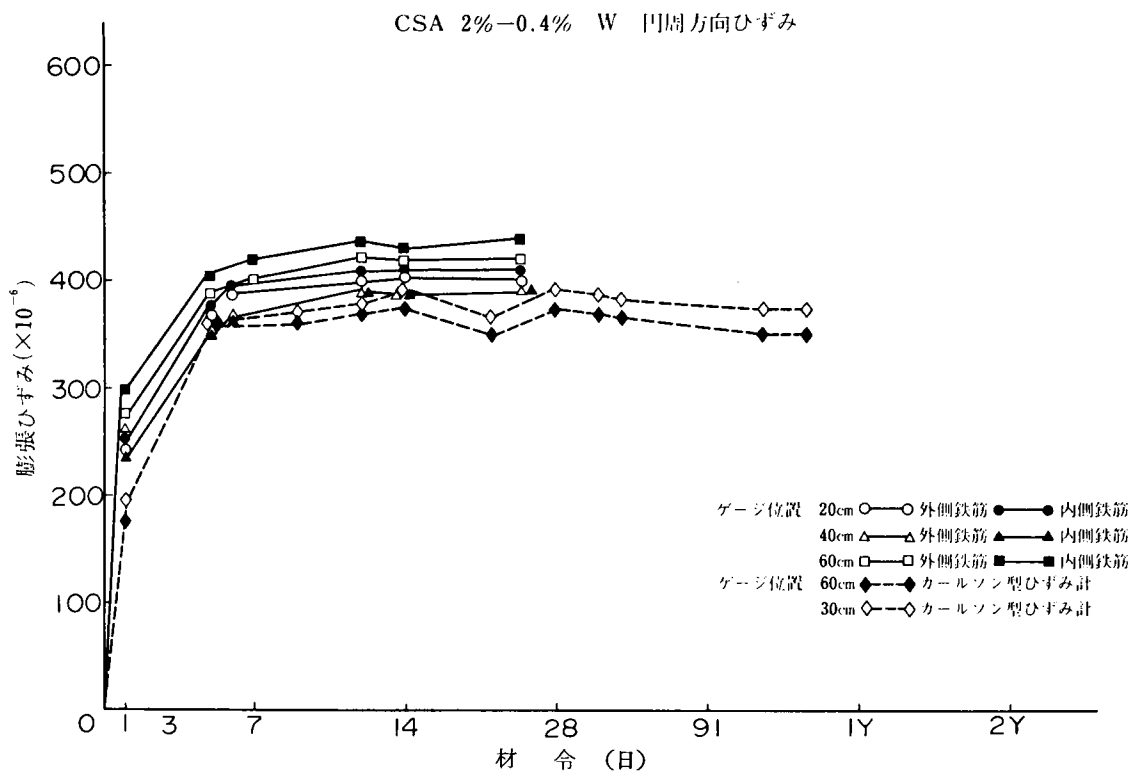
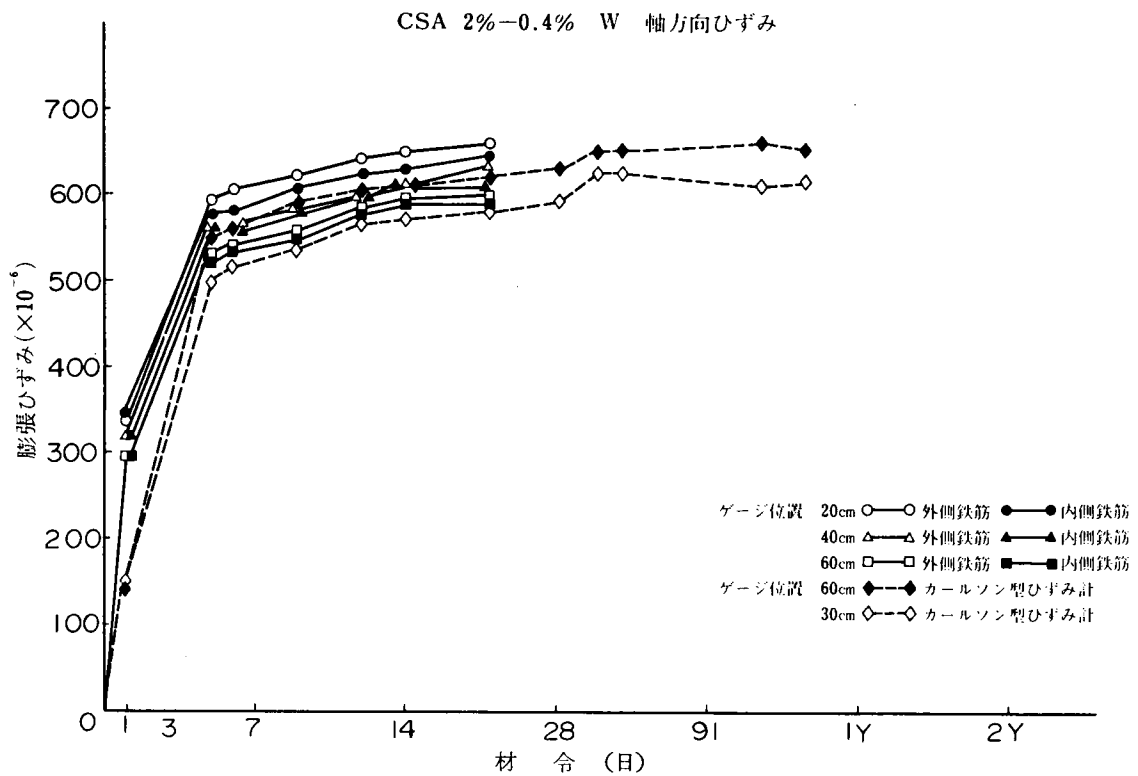
CSA 2%-0.0% W 軸方向ひずみ



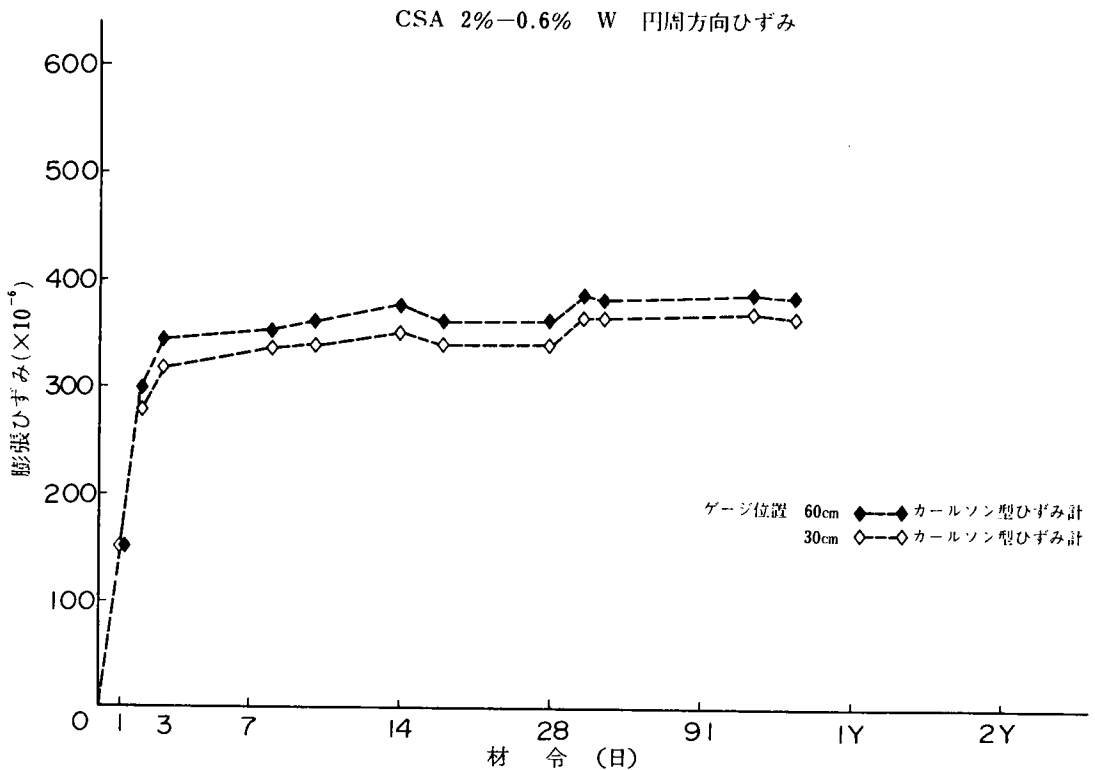
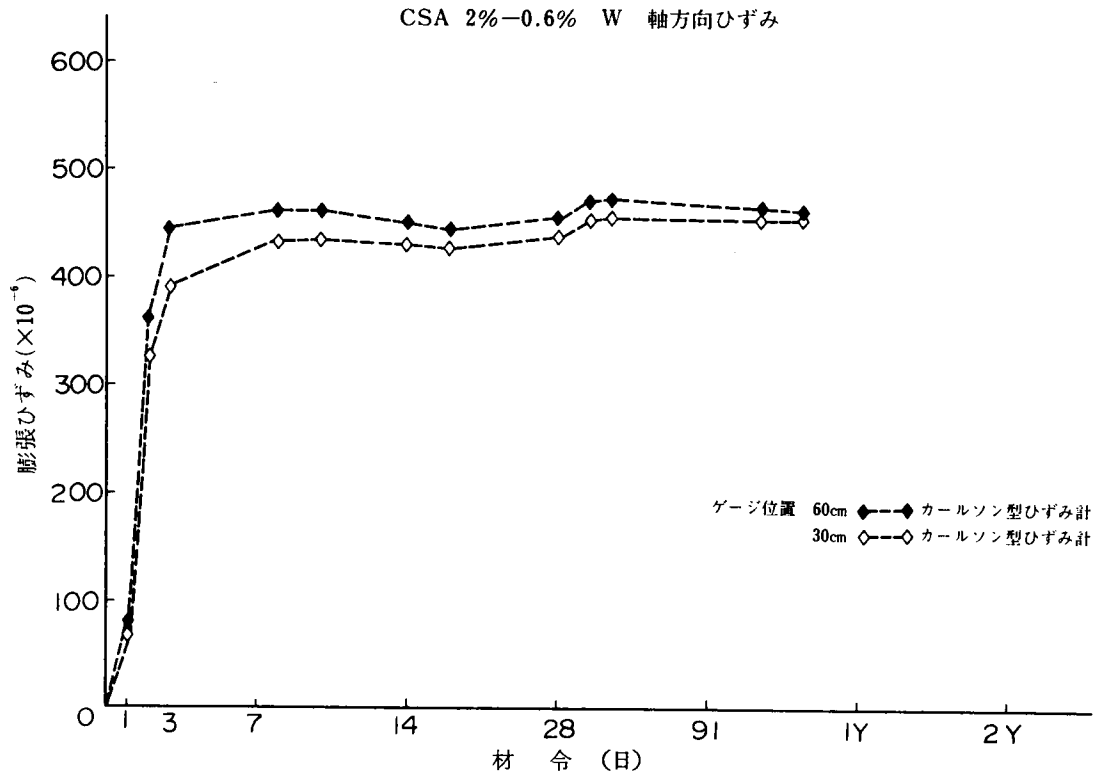
CSA 2%-0.0% W 円周方向ひずみ



付図 6-6 円筒型膨張ひずみ測定結果

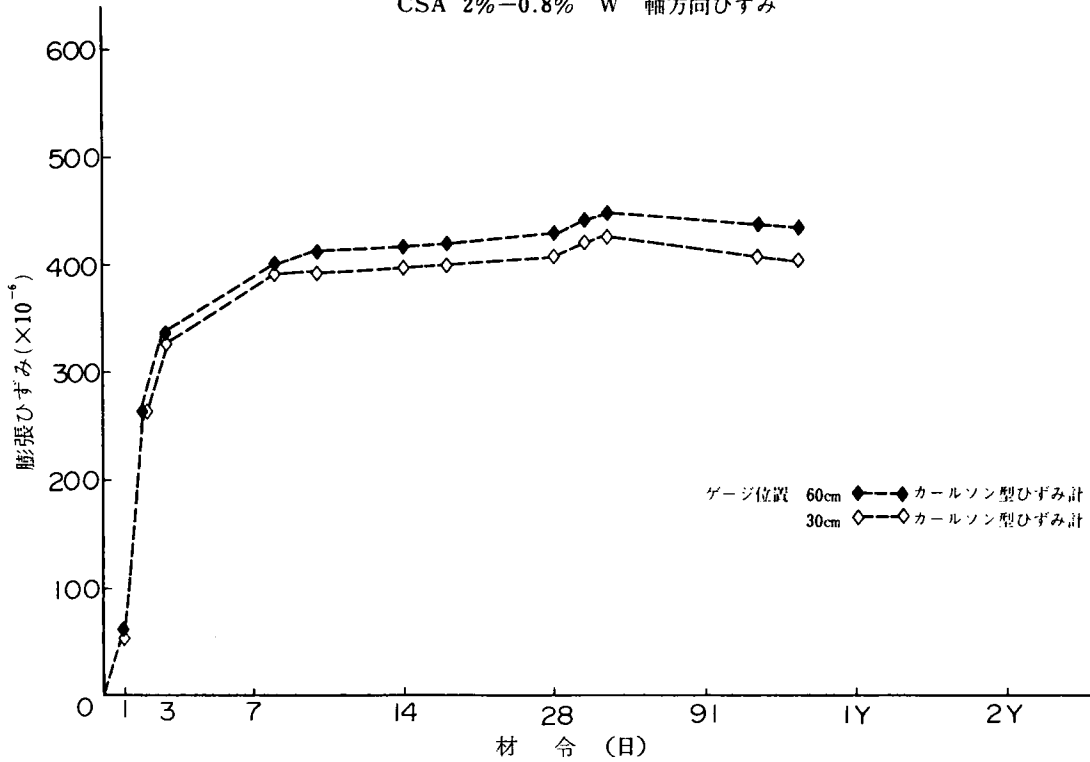


付図 6-7 円筒型膨張ひずみ測定結果

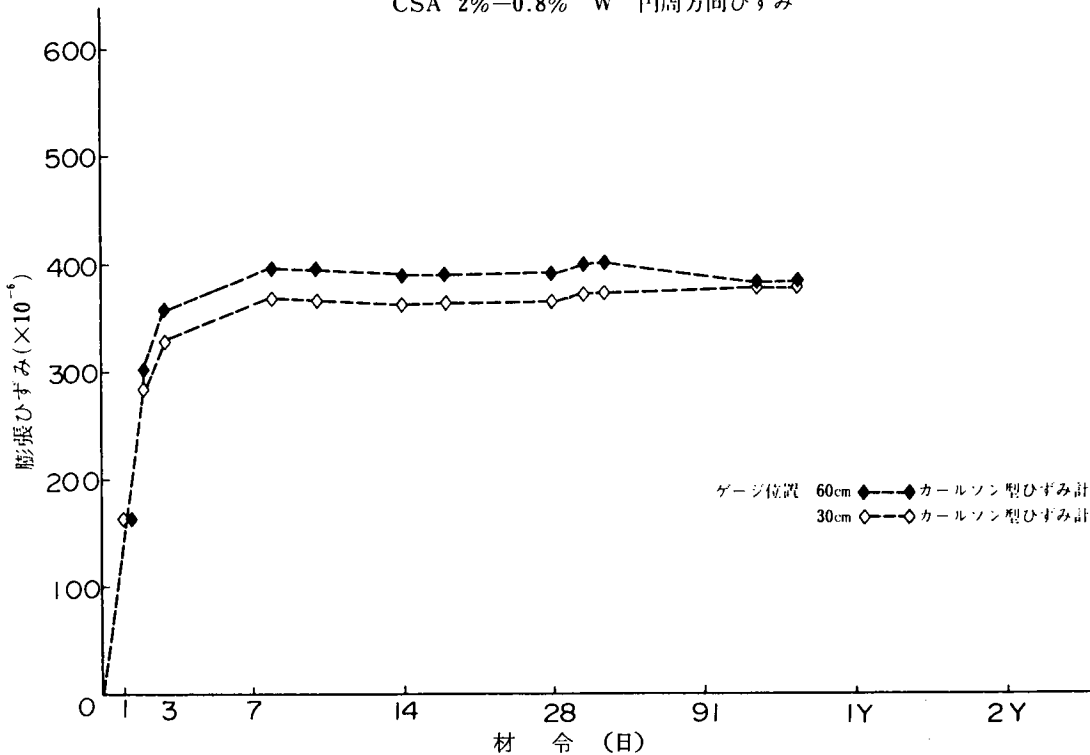


付図 6-8 円筒型膨張ひずみ測定結果

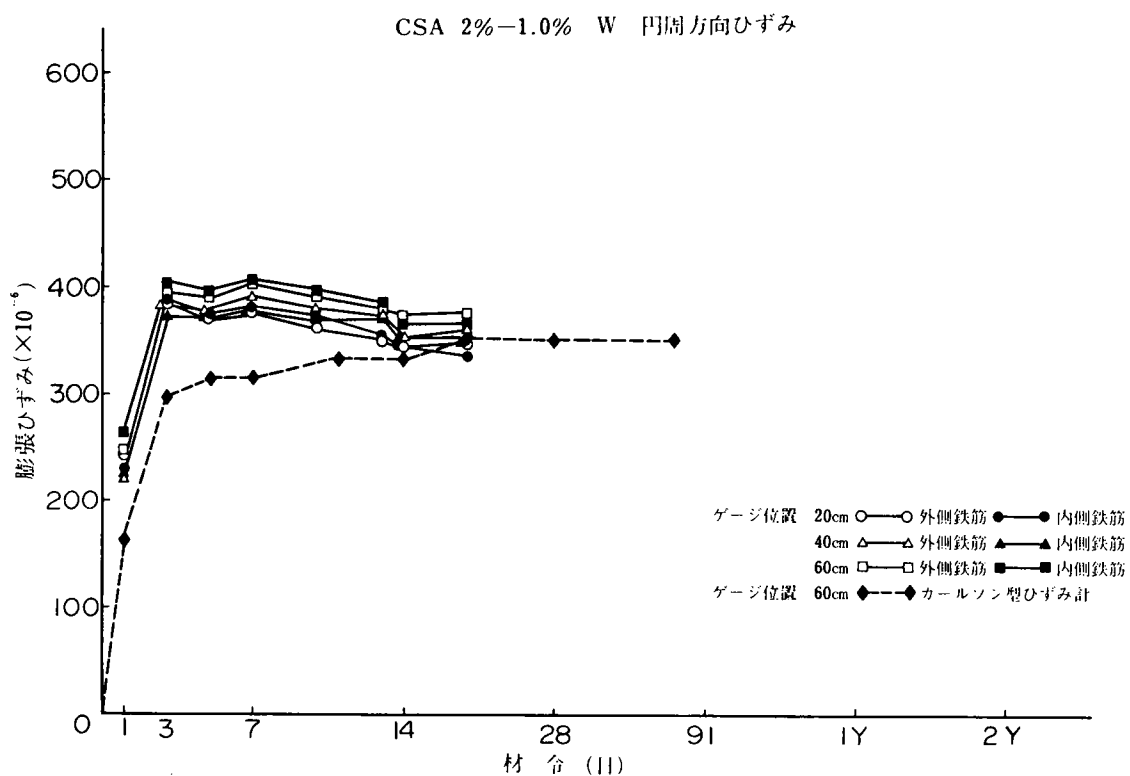
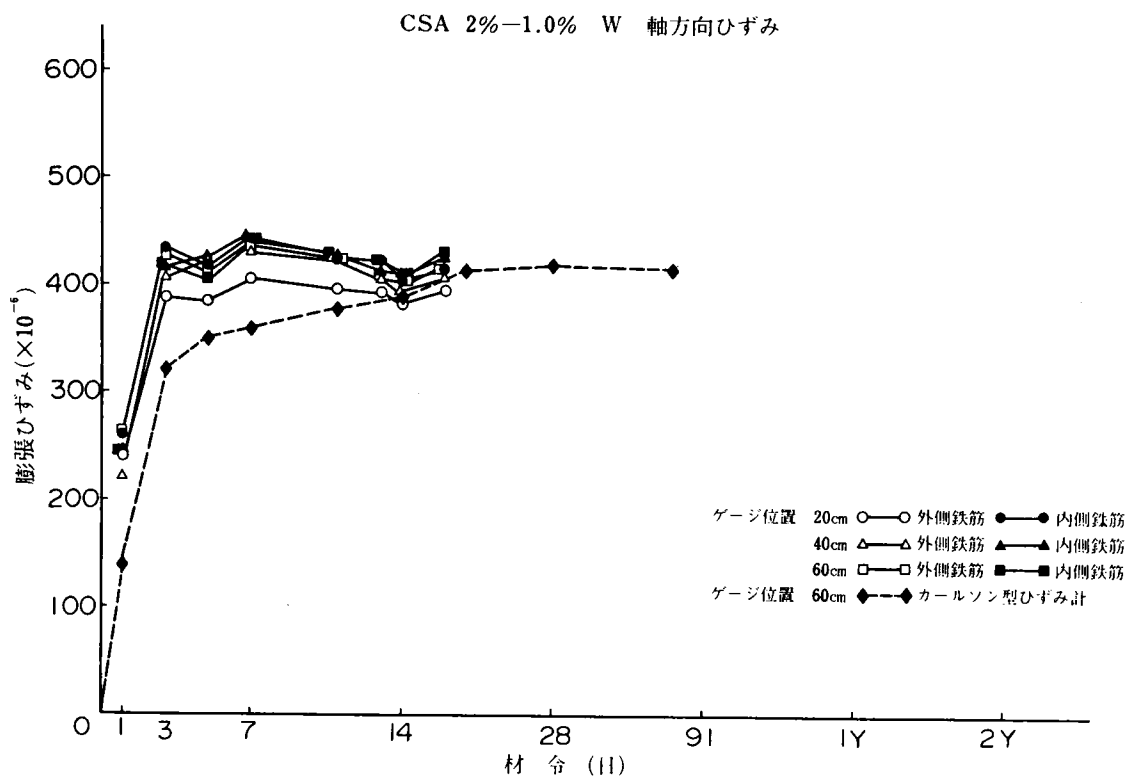
CSA 2%—0.8% W 軸方向ひずみ



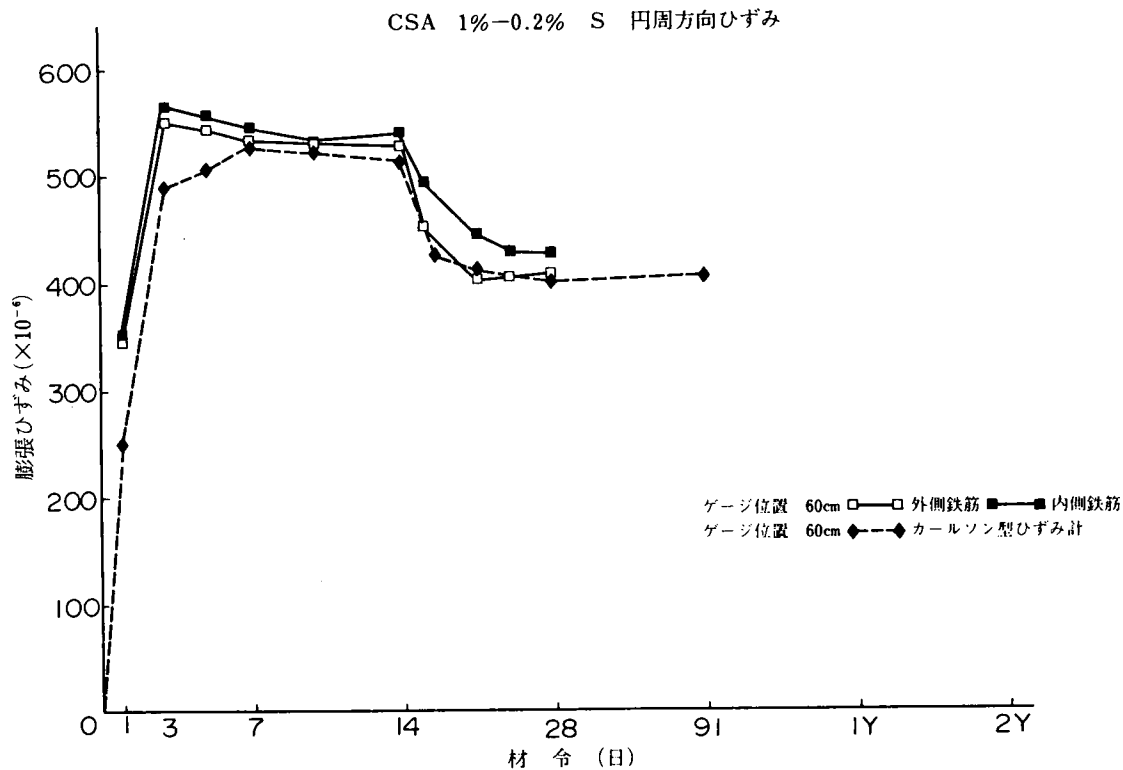
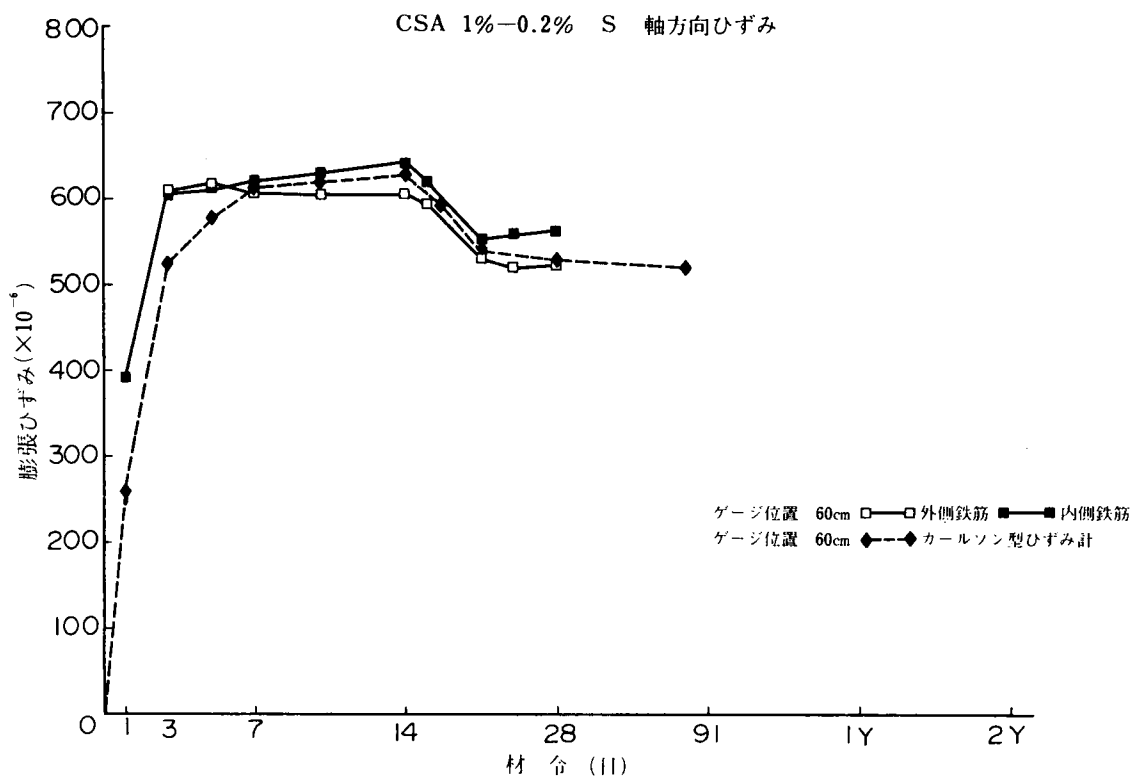
CSA 2%—0.8% W 円周方向ひずみ



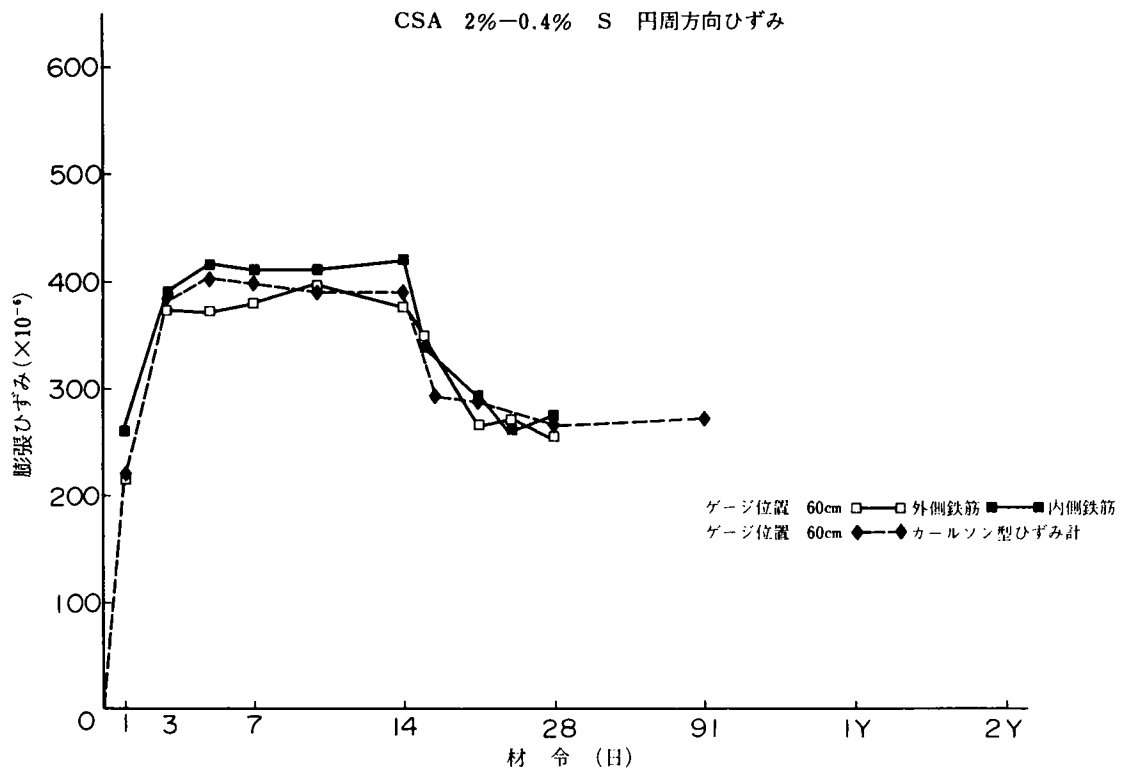
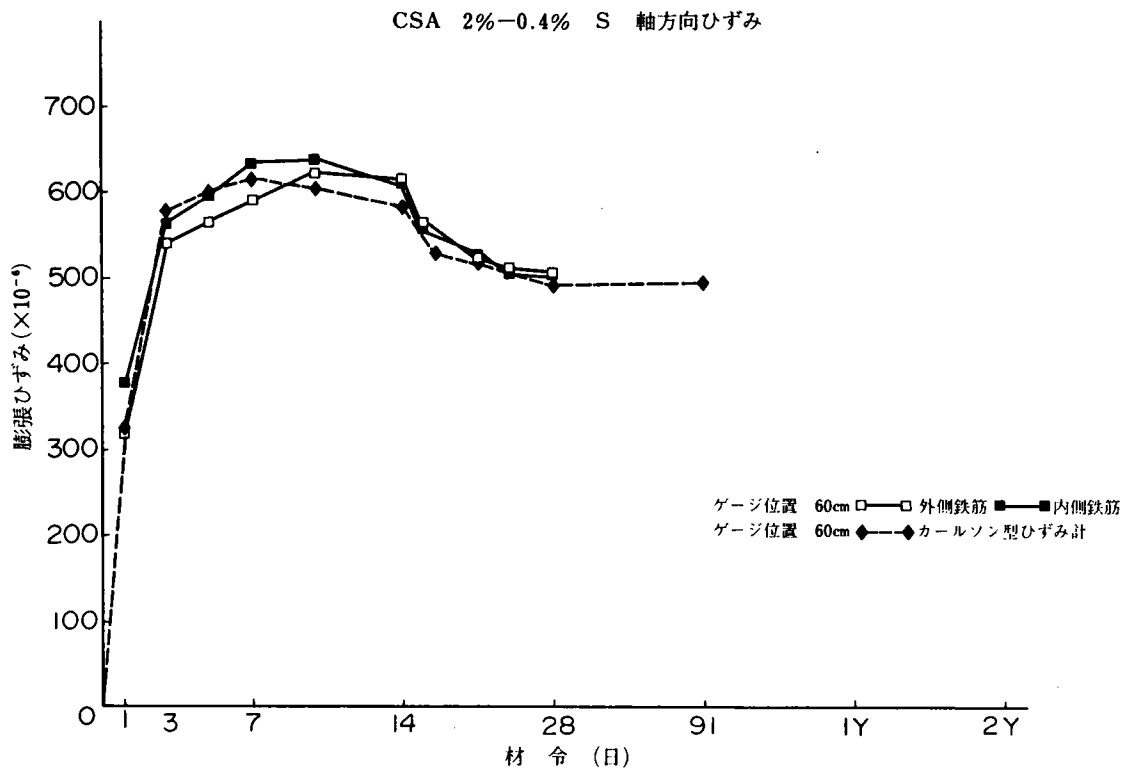
付図 6—9 円筒型膨張ひずみ測定結果



付図6-10 円筒型膨張ひずみ測定結果

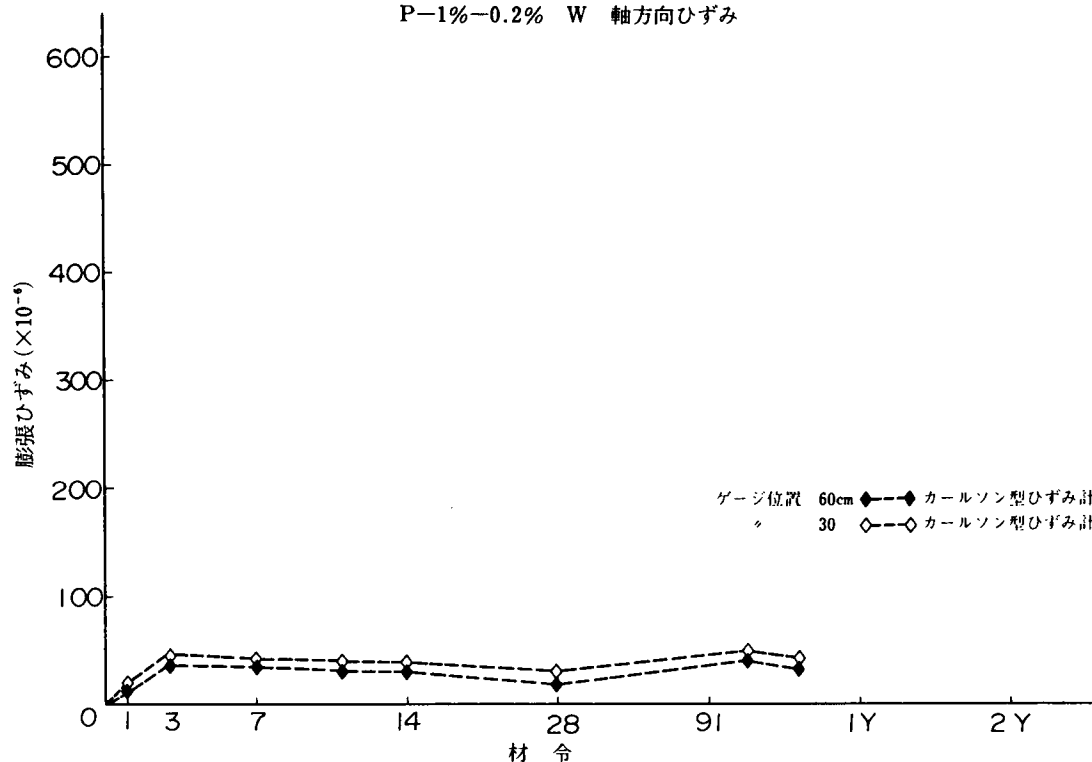


付図 6-11 円筒型膨張ひずみ測定結果

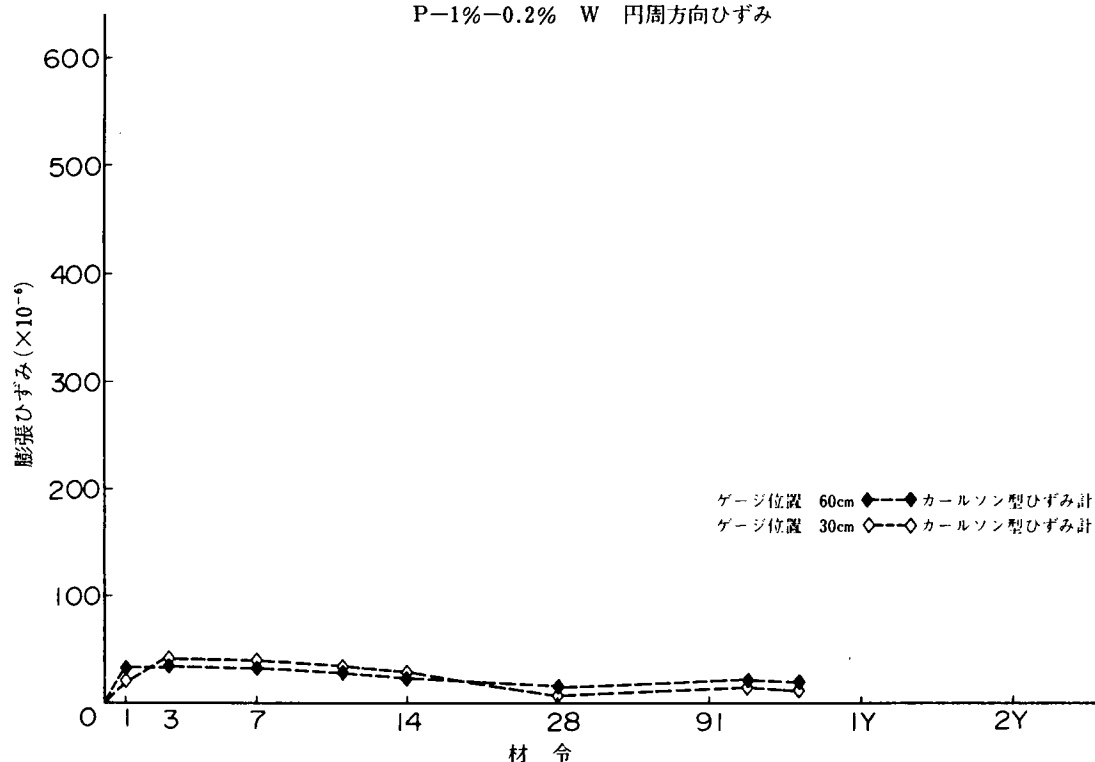


付図6-12 円筒型膨張ひずみ測定結果

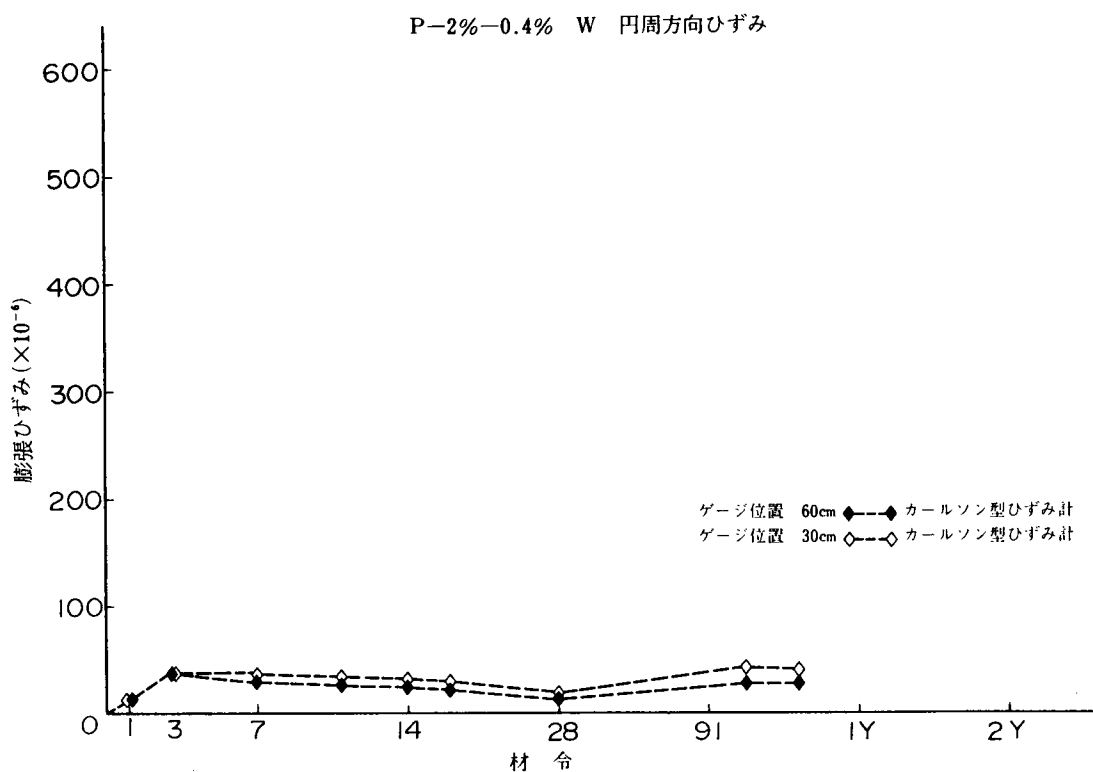
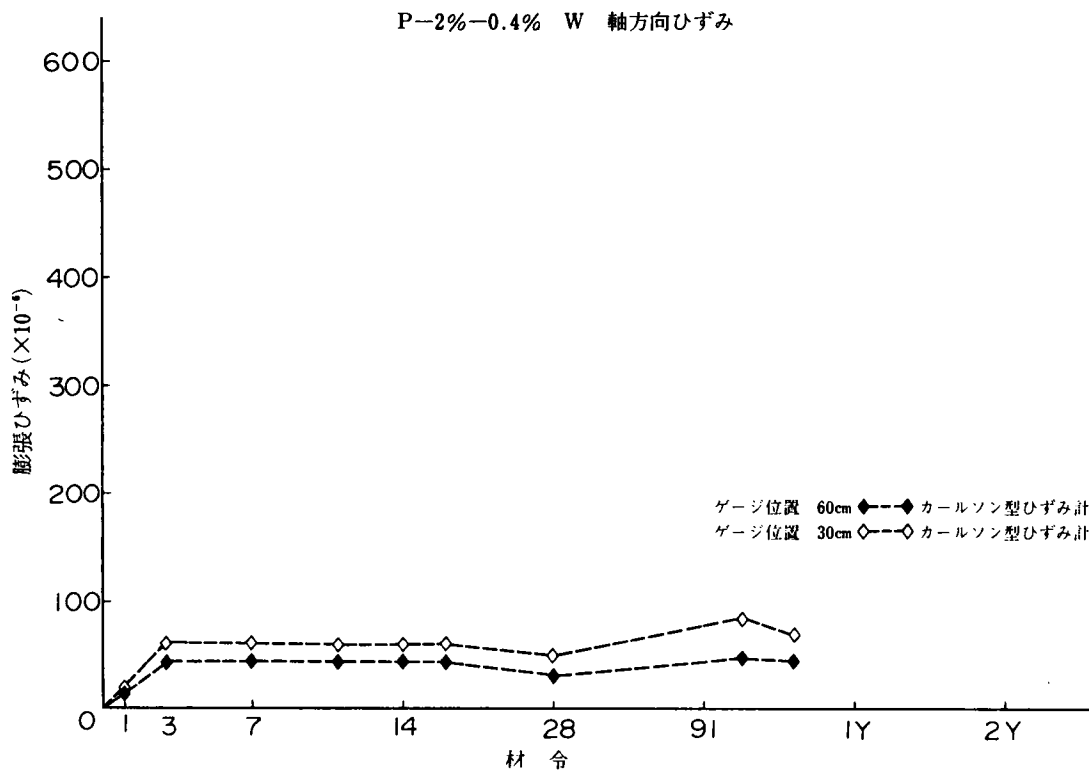
P-1%-0.2% W 軸方向ひずみ



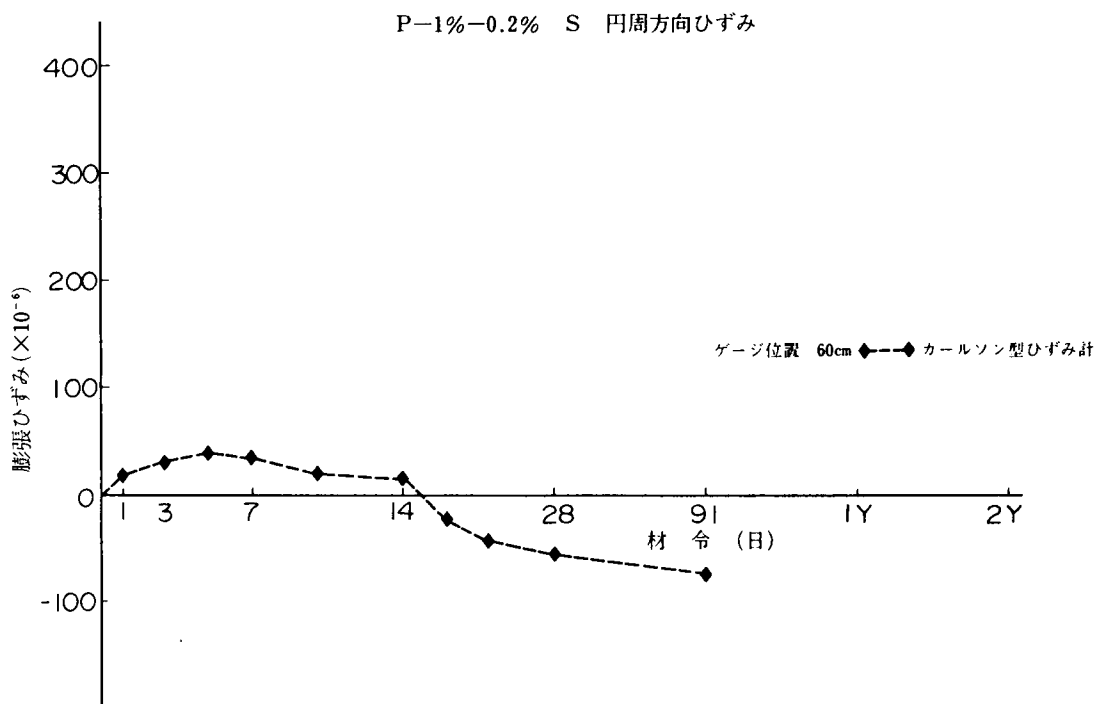
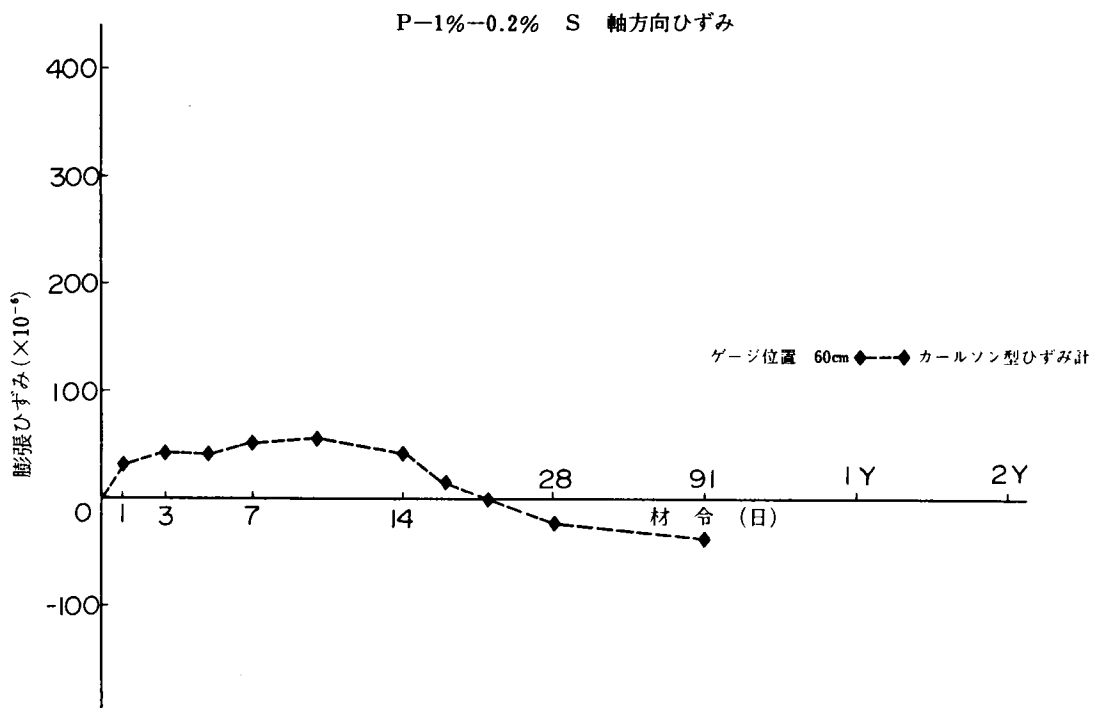
P-1%-0.2% W 円周方向ひずみ



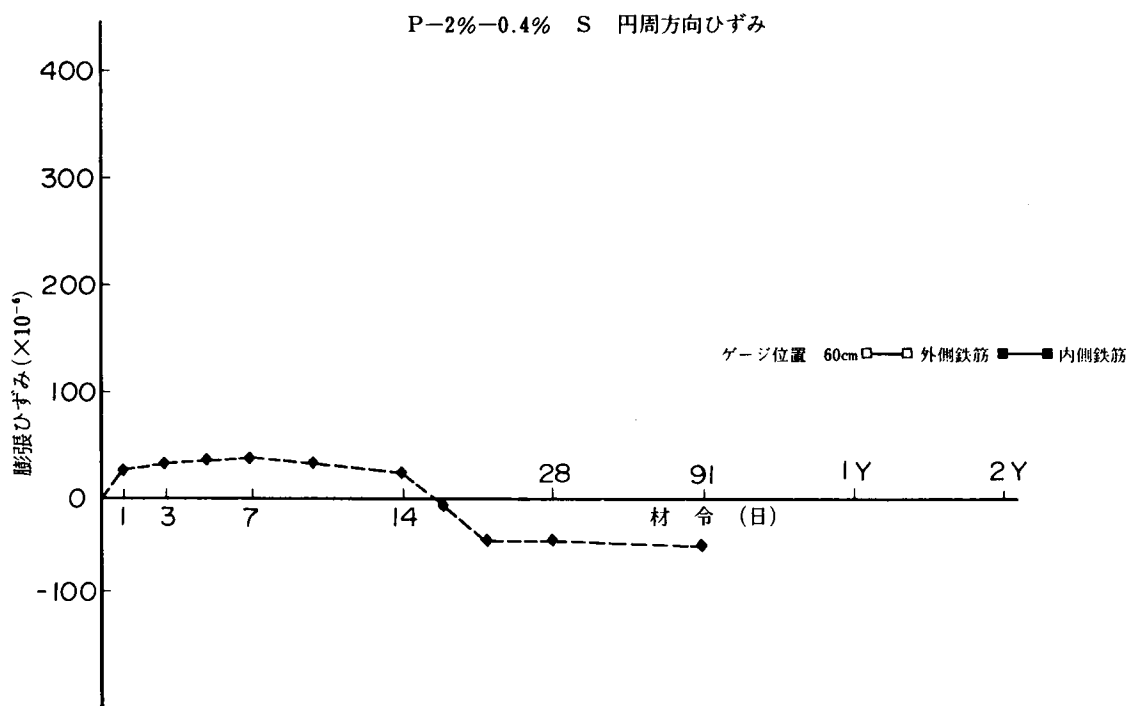
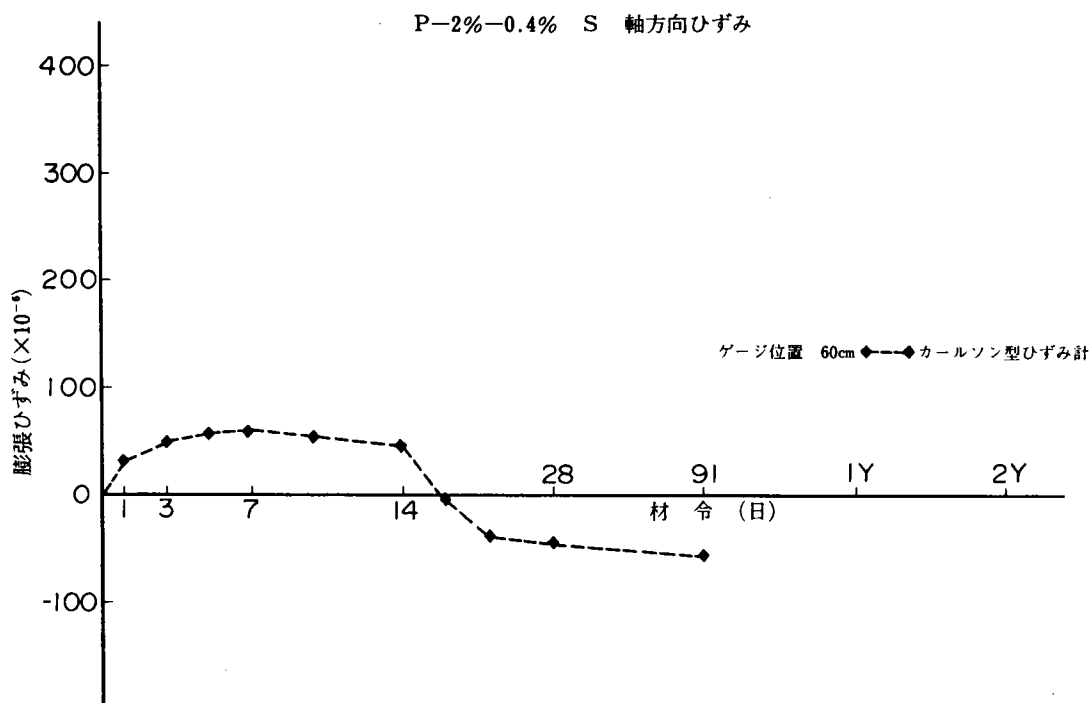
付図 6-13 円筒型膨張ひずみ測定結果



付図6-14 円筒型膨張ひずみ測定結果



付図6-15 円筒型膨張ひずみ測定結果



付図6-16 円筒型膨張ひずみ測定結果

第 7 章 膨張コンクリートの圧力トンネルの設計への適用と 施工例

7-1. ま え が き

巻立コンクリートの設計は、Otto, Frey-Baer 公式あるいは 2 次元弾性論の有限要素法を用いて巻立コンクリートの応力解析を行い、発生すると考えられる引張応力に対して必要導入プレストレスを算定し、この導入プレストレスとコンクリート自体の引張強度により十分な安全率をもって引張応力に抵抗できるように行う。

一般に発生応力の算定には Otto, Frey-Baer 公式によって設計されているが、この計算方法は次のような仮定に基づいている。

- ① 巻立コンクリートと岩盤は、一様・均質な弾性体とする。
- ② 巻立コンクリートと岩盤は、この境界面において一体となって挙動する。
すなわち、境界面においては変位は連続である。
- ③ トンネルは、無限地山中にある。
- ④ トンネルは、2 次元平面応力状態にある。

以上のような仮定に基いているので、異方性が顕著な場合などについては FEM などによる検討が必要である。

膨張コンクリートの設計については、圧力トンネルの巻立コンクリートに発生する最大引張応力を σ_t とすれば、 σ_t が次式を満足するように導入ケミカルプレストレス； σ_{cp} を決定してやればよい。

$$\sigma_t \leq (\sigma_{ct} + \sigma_{cp} \times \alpha_\varphi) \times 1 / F_s \quad \cdots \cdots (7-1)$$

ここに、 σ_{ct} ：プレーンコンクリートの引張強度

α_φ ：クリープによるプレストレスの低減率

F_s ：安全率

σ_{cp} をどれだけ導入するかは、式 (7-1) から求めることができるが、 σ_{cp} はコンクリートの配合および拘束鉄筋量等により変化するので、実験的あるいは理論的に確認する必要がある。

また、二軸拘束および円筒型の場合には、他方向からの膨張抑制作用が働いて、ケミカルプレストレス σ_p が存在することが本研究によっても確認することができたので、式(7-1)は次のように表わすことができる。

$$\sigma_t \leq \{ \sigma_{ct} + (\sigma_p + \sigma_{cp}) \times \alpha_\phi \} \times 1 / F_s \quad \cdots \cdots (7-2)$$

なお、乾燥収縮によるケミカルプレストレスの減少については考慮しないことにした。これは、導水路トンネルの工事中には十分な湿度(80%程度)が維持される環境下において散水養生も可能であること、また完成後は発電通水により巻立コンクリートを十分湿潤状態に保つことができるからである。

上述のように、内圧による引張力に抵抗するのは導入ケミカルプレストレスとコンクリート自体の引張強度であるから、おのずから限度があり設計当初の段階でこれらを十分見極めておく必要がある。水衝圧の生じるような高水圧トンネルには膨張コンクリートを適用することは現在では適策ではないであろう。本実験あるいは下小鳥発電所等の実績から推定して、プレーンコンクリートの引張強度は約30%、ケミカルプレストレスは信頼性において20~25%が限界とするならば、膨張コンクリートの引張強度として期待できるのは50~60%程度が上限と推定される。なお、図7-1、図7-2に本実験で得られたコンクリートの圧縮強度、引張強度および一軸拘束でのケミカルプレストレスの測定結果を示す。

以下、ケミカルプレストレスの導入について述べる。

7-2. 圧力トンネルにおける膨張コンクリートの設計

膨張コンクリートの設計とは、目標とする導入ケミカルプレストレスが得られるような配合ならびに鉄筋比を決定することであり、その方法として実験により設計する方法と本研究で得た一軸拘束膨張ひずみあるいは円筒型拘束膨張ひずみから理論的に設計する方法がある。なお、二軸拘束の理論式については平板構造には有効であるが、圧力トンネルとは構造が異なるため設計には適用しないことにする。

1) 実験による方法

前章までで明らかにされたように、一軸状態の膨張率試験およびはり試

験において、膨張コンクリートの引張強度はプレーンコンクリートの引張強度とケミカルプレストレスの和で表わすことができる。一方、二軸拘束および円筒型の場合には膨張ひずみから算出されるケミカルプレストレスは、一軸拘束と比較して膨張抑制作用により減少するが、プレス効果が存在するため、トータルとしての膨張コンクリートの引張強度は変化せず、むしろ配合・鉄筋比が同じならば一軸拘束状態よりも11～28%程度大きくなるのが表6-13から確認されている。

また、養生条件が湿潤状態であれば、材令14日以降の拘束膨張ひずみは一定となり、いわゆるプレクリープなるものは完了していると考えられるので、導入ケミカルプレストレスの計算も28日材令を基準として設計ができると考えられる。

以上のことから、圧力トンネルの膨張コンクリートの設計を実験的に行う方法として、一軸拘束試験による方法と円筒型試験による方法が考えられ、このフローを図7-3に示す。

一軸拘束試験による方法は、JIS A 6202に規定された方法もあるが、この場合の拘束鉄筋比は0.95%であり、実際の設計ではこれよりも大きい場合があるため、JISによる方法以外にも鉄筋比を変えて一軸拘束試験を行う必要がある。

一軸拘束試験はなんといっても容易な方法で簡単にケミカルプレストレスを算出できる利点がある。

一軸拘束試験と併行してプレーンコンクリートの割裂試験を実施し、一軸拘束試験から得られるケミカルプレストレスと割裂試験から得られる引張強度を加えた値が設計引張強度を満足するかどうか検討し、設計配合を決めることにより膨張コンクリートの設計を行うことができる。

これに対して、円筒型試験による方法は圧力トンネルを模擬した力学モデルによる内圧試験によって、引張強度、ケミカルプレストレスおよびケミカルプレスが測定あるいは推定できるので、円筒型の力学的特性を適確に把握できる利点がある。したがって、計算手段としては圧力トンネルの

モデルとして、実施設計の条件を考慮した円筒型試験により最終設計を行うことが望ましい。この場合、実験的に得たケミカルプレストレスとケミカルプレスを考慮した引張強度については、岡田他によるクリープによる低減率を考慮しなければならない。

なお、関西電力㈱下小島発電所の導水路トンネルの例では、目標導入プレストレスを決定し、それを満足する膨張コンクリートの配合を一軸および円筒型試験によって決定している。

2) 理論式による方法

第3章～第6章で述べたように、一軸、二軸および円筒型におけるケミカルプレストレスは理論的に推定することができる。しかし、二軸および円筒型の場合にはケミカルプレスを存在するが、その理論的解明には至っておらず、ケミカルプレスを含めたプレストレスの定量的評価はできないのが現状である。

しかるに、本研究により実験的に一軸、二軸、円筒型のいずれの場合でも、同一鉄筋比ならばプレーンコンクリートの引張強度とケミカルプレストレスおよびケミカルプレスの合計、つまり膨張コンクリートの引張強度はほぼ等しくなることが確認された。

したがって、圧力トンネルの膨張コンクリートの設計を理論的に行うには、一軸拘束下でケミカルプレストレスを算出すればよいと考えられるが、安全率の評価によっては円筒型の理論式によっても設計が可能である。この方法によるフローを示せば、図7-4のようになる。

また、圧力トンネルの設計はケミカルプレス効果を考慮しない一軸拘束下において行うこともできる。円筒型のプレストレスの理論式の導入は第6章で行ったが、ケミカルプレス効果を定量的に表わすことができないので、これを無視しそのかわりに安全率を低くする方法もある。つまり、プレス効果を期待することにより安全率を小さくし、ケミカルプレストレスと引張強度で設計をする。この場合には円筒型の理論式は有効である。さらに、プレス効果が今後の研究により定量的に評価されれば、一層有効な

ものとなるであろう。

なお腹筋については、二軸拘束試験および円筒型試験結果から腹鉄筋（腹鉄筋 / 主鉄筋 = 10～50%）によって主鉄筋ひずみが大きく影響を受けないことが判明し、実際の設計に当っては腹筋はプレストレスに影響を与えないとして設計しても支障ないと思われる。

7-3. 圧力トンネルへの適用例

1) 下小鳥発電所導水路トンネルへの適用¹⁾

(1) 地形、地質、使用箇所

下小鳥発電所は、神通川水系小鳥川（岐阜県吉城郡河合村）に設置された最大出力 142,000 Kw の水路式発電所で、延長 8,536 m の導水路トンネルのうち地山被りの薄い下朝川原谷付近 230 m 間に膨張コンクリートを使用しており、その縦断面を図 7-5、図 7-6 に示す。

地山被りは谷の直下で 40 m しかなく、その地質は A 区間では比較的良好で石灰質岩石から変成された石灰質片麻岩から構成されており、花崗閃緑岩質片麻岩、黒雲母花崗岩質片麻岩、および石灰珪酸塩岩からなる代表的な飛驒コンプレックスである。B 区間は所謂、破碎帯で A 区間と同じ片麻岩が完全に圧砕され、粘土が多くみられた。粘土は非常によく圧密されており水も幾分含んでいた。

(2) 設 計

本トンネルは内径 4.7 m で高圧（静水圧 7.7 %、最高圧 10.2 %）であるため、設計諸元の決定には内圧が支配的であり力学的検討は内圧だけを考慮した。

応力計算は Otto, Frey-Baer 公式を用いており、巻厚、配筋については表 7-1 のとおりに決定し、応力計算結果を表 7-2 に示す。

次に、膨張コンクリートの目標強度および導入プレストレス量を次のように設定した。

- (a) 常時荷重（最大静水圧 7.7 %）に対し、安全率（引張耐力 / 発生応力）を 2.0 とする。

(b) 外水圧およびトンネル周辺グラウトによるプレストレスや岩盤の改良は期待しない。

(c) 最大静水圧に対するコンクリートの発生応力は岩盤の弾性係数を A 区間 20,000 %、B 区間 500 % と仮定するとコンクリート内壁で最大値となり、その値は次のとおりである。

A 区 間 21.2 %

B 区 間 22.2 %

(d) 膨張コンクリートの引張耐力は、コンクリート自体の引張強度と導入ケミカルプレストレスの和を考える。ここで、コンクリート自体の引張強度は、圧縮強度 400 % に対して、圧縮強度と引張強度の比を 16 と仮定して 25 % とした。

以上から、目標導入プレストレスは、

A 区 間 $21.2 \times 2 - 25 = 17.4 \div 18 \%$

B 区 間 $22.2 \times 2 - 25 = 19.4 \div 20 \%$

となり、各種の実験を行いコンクリートの配合、鉄筋比などを決定した。

なお膨張コンクリートの施工区間の延長については、漏水に対する浸透流計算の結果、パイピングおよび漏水量については安全であることを確認して決定した。

(3) 施 工

示方配合は実験の結果表 7-3 に示すとおりで第 1 回目の打設を行ったが、スランプ 15 cm ではセメント量が多くコンクリートに粘着性があり、コンクリートプレーサーによる圧送および施工が困難であったため、第 2 回目以降の打設では、ワーカビリティ改善の目的でスランプを 18 cm に変更した。この変更に当り、単位膨張量 W/C、S/a は不変とし、示方配合は表 7-3 に示すものとした。

膨張コンクリートの打設量および圧縮強度等を表 7-4 に示す。打設後の養生については、ほぼ打設後 2 日目から 7 日間散水養生を行った。このようなマスコンクリートになると、コンクリート自体の発熱が相当

激しく冷水を散布することはコンクリート内部と表層部の温度差を著しくし、かえって温度応力による亀裂発生危険性が高まるので、脱型時からコンクリート表面の温度をチェックし、30℃以下を目安として散水することにした。

なお、建設終了時点でトンネル内の膨張量を計測しており、円周方向の膨張特性の一例を図7-7に示す。図7-7はB断面の鉄筋ゲージのひずみ測定結果であり、絶対値にはかなりのバラツキがあるが、材令12時間～1日の間に一度膨張のピークが現われ、材令2～3日頃までやや減少傾向をみせた後再び増加する。材令2～3日の膨張量の減少は温度の影響と考えられる。つまり、巻立コンクリートの昇温のピークは12時間～1日の間にあり、以後減少しているからである。AおよびB断面におけるコンクリート温度の実測結果を図7-8に示す。

また、図7-7において膨張ひずみの最終値はグラウト完了後で充水前の値であり、計器の信頼度が高く測定値の変動も小さいとされているBR-5、BR-7を採用すれば $350 \sim 500 \times 10^{-6}$ となる。ここに、拘束鉄筋比は1.59%であり、鉄筋の弾性係数を 2.1×10^6 %とすると、導入ケミカルプレストレスは11.7～16.7%となる。実際のコンクリートには、これにケミカルプレストレス効果も加わるので引張強度はさらに増大しているものと考えられる。なお、昭和48年5月、発電所運転開始以来10年間において数回の断水期間中、綿密な検査を実施したが膨張コンクリート区間にはクラックが存在せず、この工法が完全に成功したことが確認された。

2) 新愛本発電所計画地点導水路トンネルへの適用

(1) 地形、地質、膨張コンクリート施工箇所

関西電力㈱新愛本発電所は、黒部川水系黒部川(富山県下新川郡)に設置される最大出力124,000Kwの水路式発電所で、延長10,818mの導水路トンネルのうち、地山被りの薄い音谷および弥太蔵谷付近約400m間に膨張コンクリートを使用する計画であり、各谷の縦断面を図7-9

～7-11に示す。

地山被りは音谷および弥太蔵谷において、谷直下で各々16.6m、27.1mしかなく、その地質は良好な花崗岩および閃緑岩（C_M～C_Hクラス）から成っており、透水性に関しても比較的密着した透水度の低い岩盤となっている。

前記、下小鳥発電所の例にならって、当工事においても膨張コンクリート工法を適用すべく検討中である。

(2) 計画設計

本トンネルの内圧は音谷、弥太蔵谷で各々静水圧が5.1%、4.5%、サージング時にそれぞれ8.5%、6.9%となっている。

巻厚、鉄筋量についてはOtto、Frey-Baer公式で各種検討の結果、内径4.8m、巻厚0.6、鉄筋比1.7%（D29ctc 125mmダブル相当）とし、音谷地点における応力計算結果を表7-5に示す。設計にあたっては岩盤の弾性係数は安全性を考慮して10,000%とし、安全率は常時2.0、サージング時1.5として次のように設計強度を決定した。

常時 $16.7 \times 2.0 = 33.4\%$

サージング時 $27.9 \times 1.5 = 41.9\%$

この設計強度に対して、膨張コンクリートのケミカルプレストレス、ケミカルプレス、およびプレーンコンクリートの引張強度の和にクリープを考慮して得られた破壊強度が大きくなるようにする。

膨張コンクリートの破壊強度は、表7-6に示す円筒型内圧試験結果により決定している。No.1～4は夏期に、練混ぜ後約1時間経過してから打設したもので練上り温度が30℃を越えている。一方、No.5および6は練混ぜ後すぐに打設し、練上り温度も25℃となっている。設計に際しては、現場での施工条件の悪い場合を考慮して、No.1～4を対象とし破壊強度を47.4%とした。そのうち、ケミカルプレストレスおよびケミカルプレスは円筒型試験から16.1%とし、クリープによるプレストレスの残存率を83%として、膨張コンクリートの破壊強度は

$$16.1 \times 0.83 + 31.3 = 44.7 \%$$

となり、設計強度より大きく充分安全な設計となっている。

ここで、31.3%はプレーンコンクリートの円筒型試験による引張強度である。また、テストピースによる純引張強度（28日材令）は338%の値が得られており、圧縮強度試験からも356%の値を得ており、これより純引張強度は $356 \times (\frac{1}{10} \sim \frac{1}{13}) = 35.6 \sim 27.4 \%$ と推定され、プレーンコンクリートの引張強度31.3%は慎重に施工することにより十分に確保できると考えられる。

なお、鉄筋については次のような配慮が必要である。つまり、ケミカルプレストレス導入時の鉄筋の引張応力については、設計内圧によるものだけではなく、ケミカルプレストレスによっても引張応力をすでに発生しているので、両者を含めて検討しなければならない。たとえば新愛本の場合、ケミカルプレストレスが20%と仮定すれば、ケミカルプレストレスによる鉄筋の引張応力は既に1,176%となっており、さらに設計水圧によって引張応力が加味されて最終的に全引張応力は1,485%となる。この値は、鉄筋の許容応力（SD35）2,000%に対して安全である。

なお、音谷における漏水に対する検討の結果、膨張コンクリートの巻立区間長が210mあれば、浸透流速およびその動水勾配が地山に及ぼす影響は小さく、安全であることを確認している。膨張コンクリートを使用する場合においては、このような点にも十分に配慮しなければならない。

7-4. 施工上の留意点

普通コンクリートでも適切な養生を必要とするのは当然であるが、膨張コンクリートはとくに厳密な養生を必要とする。このことは、膨張の生成機構がエトリングタイトの生成であり、それが養生温度と水の量によって大きく影響を受け、ケミカルプレストレスの量が支配されるためである。したがって、膨張コンクリートを圧力トンネルに適用するに際し、施工上とくに留意しなければならない事項について述べる。

1) 膨張材のプレミックス

一般的には膨張材は現場で目的に応じた量を解袋投入しているが、圧力トンネルにケミカルプレストレスを導入する場合は厳しい品質管理が必要であり、そのためには予め工場で混合し、プレミックス品として使用すべきであるとする。プレミックス品の工場における品質管理は、各バッチ毎にサンプリングしたものについてセメント中の SO_3 量を蛍光線分析により計量し、膨張材の混入量を正確にチェックしている。

なお、参考として膨張材の混入量を変動させて、圧縮強度（テストピース $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ ）および膨張率（JIS A 6202 B法による。）を測定した。試験に用いた配合は表 7-7 に示すものであり、圧縮強度試験結果を図 7-12 に、膨張率試験結果を図 7-13 に示す。その結果、圧縮強度については型枠拘束の場合には混入量の変動（ $\pm 10 \text{ kg/m}^3$ ）による差は顕著でない。膨張率については、膨張材 5 kg/m^3 の増減に対して約 250×10^{-6} の膨張ひずみの増減があり、ケミカルプレストレスに換算すれば約 5% となる。したがって、膨張材量の管理については、マイナスは認めずプラス 5 kg/m^3 の範囲で行う必要がある。

また、膨張材は自己反応性があるため、保存期間が長くなるとこれを用いた膨張コンクリートの膨張量は少なくなるので、保管はビニール梱包が必須条件であり、3 ヶ月以上の保管は避けるべきである。

2) バッチャープラント

プレミックス方式の場合、プラント自体にはとくに問題はないが、練り混ぜ後から打設までの時間ができるだけ短くなる場所に配置すべきである。このことは表 7-6 から類推することができる。

3) コンクリートの運搬、圧送および打設

膨張性状に対する練り上り温度、練り置き時間の影響は大きく、また施工上避けられない問題である。長時間の練り置きはエトリングaitの生成を促進し、コンクリートの膨張にこの水和物を有効に利用できなくなり、膨張は小さくなる。そこで、練り上り温度、練り置き時間をファクターと

して膨張試験を行った。

配合は、表 7-7 に示すうち 360-60 のものを使用し、練り上り温度は 20℃、30℃の 2 ケース、練り置き時間は練り上り温度が 20℃ の場合、0、40、80、120 分の 4 ケース、30℃ の場合 0、30、60、90 分の 4 ケースについて試験を行い、その結果を図 7-14 に示す。なお、コンクリートは所定時間練り上り温度と同一温度で放置し、再度強制練りミキサーで約 30 秒混練後打設した。30℃ のものは、打設後 1 時間で 20℃ の室内へ戻した。

練り上り温度が 20℃ の場合、1 時間半～2 時間の延滞で最大膨張ひずみが約 10 % の低下であるが、30℃ の場合には 1 時間の延滞で約 50 % の低下を示しており、このような場合、現場においてはこのコンクリートは棄却すべきと考えられる。また 30℃ の練り上り温度では、延滞が無い場合でも 20℃ に比較して約 20 % の低下が見られるため、練り上り温度はできるだけ 25℃ 前後にするべきである。

コンクリートの打設方法については、普通コンクリートと特に変わらないが、膨張材の効果を十分に活かすためには間隙の存在をなくすよう入念に施工し、各部（特にトンネルの天端等）にコンクリートが行きわたることが重要である。

4) 養生

養生条件がケミカルプレストの導入つまり膨張特性に与える影響は大きい。図 7-15 に膨張ひずみの測定結果を示す。材令 28 日において、水中養生と 14 日間湿布以後気乾（20℃、65% R.H）を比較すると、後者は前者に対し約 20 % の膨張ひずみの低下が見られる。図 7-15 に見られるように膨張コンクリートの膨張は、打設後約 14 日でピークに達するため、膨張効果を十分に発揮させるためにはその間コンクリート表面が乾燥しないよう湿潤状態を保つことが好ましい。また、それ以後も湿潤状態を保てば、膨張は一定となり十分なケミカルプレストレスの導入が維持できると考えられる。

しかし、圧力トンネルのようなマスコンクリートになると、コンクリート自体の発熱が相当激しくなるので、これに冷水を散布することはコンクリート内部と表層部の温度差を著しくし、かえって温度応力による亀裂発生が心配される。

コンクリート温度について、各種の供試体で測定した結果を図 7-17～図 7-20 に示す。図 7-17 および図 7-18 は各々膨張試験体およびはり試験体の温度履歴であり、温度上昇は 4～5℃で打設後約 20 時間でピークに達している。また、膨張コンクリートと普通コンクリートでは温度特性に大きな差はない。

一方、図 7-19 および図 7-20 は、圧力トンネル断面を模擬したマスコンクリートモデルであり、温度上昇は 40～45℃もあり、コンクリート内部温度は 70℃にまで達している。また、ピークに達する時間も 12 時間程度で、小さな供試体よりも相当早くなっている。このマスコンクリートモデルに相当するものとして、下小島発電所導水路トンネルにおけるコンクリート温度の測定結果も図 7-8 に示すように、マスコンクリートモデル同様に 75℃程度まで温度上昇が認められ、ピークに達する時間は約 24 時間とやや遅い。なお、マスコンクリートモデルでは表 7-8 に示すように、打設温度にまでコンクリート温度が降下するのに 5～6 日かかっている。

以上の温度測定結果を断面形状で整理すると、図 7-21 のようになり、試験体の断面積が 1,000cm² 以上であればコンクリート温度のピークはほとんど変わらない。また、同図に示すように、拘束鉄筋比が一定の場合、膨張ひずみは水和熱によるコンクリート温度上昇および断面形状にかかわらずほぼ同じになることが確認できた。

したがって、膨張コンクリートの湿潤（散水）養生については、水密性の良い普通コンクリートと同じくコンクリート内外の温度差による応力だけが問題となり、これをできるだけ小さく、かつ膨張効果を十分に発揮させるためには、コンクリート温度が降下し始めた頃（コンクリートの硬化

が終了時で、打設後約 1 日経過した頃) より散水する方法 がよいと考えられる。

また、冬期コンクリートあるいはトンネル内のように気温が低い場合には、シート等でコンクリート表面を外気よりしゃ断してやることも必要である。

5) 打設コンクリートのケミカルプレストレスの計測

実際の構造物においては、鉄筋の拘束だけでなく、周囲の岩盤等の影響も存在するため、構造物の安全の確認および膨張コンクリートの特性把握の観点から打設後の膨張量、応力を計測し、ケミカルプレストレスの量を把握しておくことが望ましい。

第 7 章 参考文献

- 1) 関西電力㈱編集；下小島水力発電所工事誌、事務・土木・建築編、1977.8

表 7-1 巻厚および配筋

	A 区 間 (巻厚60cm)	B 区 間 (巻厚80cm)
主 筋	D32 etc 150 ダブル	D32 etc 150 ダブル
鉄 筋 量	105.9cm ² /m	127.1cm ² /m
鉄 筋 比	1.78%	1.59%
配 力 筋	D25 etc 400 ダブル 25.3cm ²	D25 etc 300 ダブル 33.8cm ²
主鉄筋に対する配力筋の割合	25.9%	26.6%
か ぶ り	15cm	20cm
ダ ブ ル 鉄 筋 の 間 隔	30cm	40cm

表 7-2 膨張コンクリート応力計算結果

(内径4.7m、内圧10kg/cm²)

(1) A 区 間

単位 kg/cm²

地山弾性係数 Er kg/cm ²	コンクリート引張応力		鉄筋引張応力
	内 壁	外 壁	
10,000	31.7	24.3	351
20,000	27.5	20.7	308
30,000	24.5	18.1	278
40,000	23.0	17.1	260
50,000	19.8	14.4	230

(2) B 区 間 単位 kg/cm²

地山弾性係数 Er kg/cm ²	コンクリート引張応力		鉄筋引張応力
	内 壁	外 壁	
500	28.8	20.6	320
1,000	28.7	20.5	318
5,000	27.5	19.5	306

表 7-3 示 方 配 合

(1) 当初の配合 (スランフ=15cm)

Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/c (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					混 和 剤	
					W	C	CSA	S	G	ブラスト クリート H-I	シーカ AER
25	15±1	4±1	47.1	41.1	179	380	70	683	959	1.0%	0.012%

(2) 現場で決定した配合 (スランフ=18cm)

Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/c (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					混 和 剤	
					W	C	CSA	S	G	ブラスト クリート H-I	シーカ AER
25	18±1	4±1	47.1	41.1	185	394	70	675	947	1.0%	0.012%

表7-4 膨張コンクリート打設実績

打設ブロック		400		500		600		800		500		600		500					
項	目	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	
打設	ク	No.	8/7	8/10	8/25	8/28	8/31	9/4	9/7	9/11	9/14	9/16	9/20	9/23	9/28	9/30	10/3	10/6	10/9
	設	日	CH	CH~CL	CL	CL	CL~CH	CH	CH	CH	CH	CH	CH	CH	CH	CH	CH	CH	CH
岩盤	等	級	40	40~80	80	80	80~60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	コンクリート	巻厚 (cm)	215	279	336	298	315	274	257	235	240	249	281	262	294	264	272	226	290
打設	量	(m ³)	12	14	18	15	17.5	15.5	12.5	15	20.5	14.5	20.0	12.0	15.5	15.0	14.5	13.7	13.5
	所要時間 (hrs)		17.9	19.9	18.1	19.9	18.0	17.7	20.6	15.7	11.7	17.2	14.0	21.8	19.0	17.6	18.8	16.7	21.9
打設	速	度 (m ³ /時)	2	2	2	2	2	1	2	2	0.5	2	1	4	1	1	2	2	2
	置	期 (日)	3	3	3	3	4	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3
壊材	令 (日)		26	29	24	21	29	30	29	28.5	24	24	24.5	23	23	20.5	22	22	24
	練上り温度 (℃)		14	19	18.5	19.7	19	18.6	19.4	18.5	23.8	18.9	21.3	21.2	21.4	18.5	19.2	21.2	20.3
コンクリートの性質	S. L (cm)		3.2	3.6	4.2	3.5	3.6	3.4	3.5	3.2	3.4	3.4	3.2	3.4	3.2	3.4	3.2	3.4	3.4
	A I R (%)		7日	327	268	368	251	319	276	305	307	249	307	333	340	283	294	259	236
硬化コンクリート	強度 (kg/cm ²)		28日	456	406	440	378	401	356		435		409	434	339		272		
	91日					440													
7日膨張量(×10 ⁻⁴)					480(10日)	318(9日)	313	270(9日)	300	340	310	300	265	250	210	195	300	465	

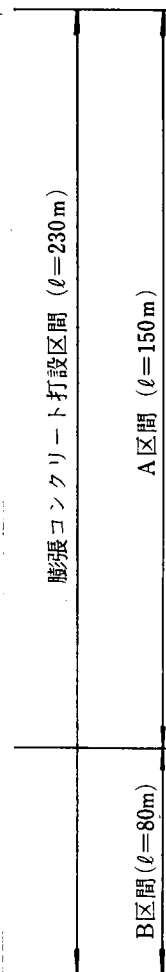


表 7-5 音谷地点における応力計算結果

内圧 (kg/cm ²)	弾 性 係 数 (kg/cm ²)		発 生 応 力 (kg/cm ²)		
	岩 盤	グラウトゾーン	コンクリート	鉄 筋	岩 盤
8.5	10.000	—	27.9	309	0.9
	15.000	—	26.2	290	1.2
	20.000	—	24.7	274	1.6
	10.000	20.000	26.0	287	1.7
5.1	10.000	—	16.7	185	0.5
	15.000	—	15.7	174	0.7
	20.000	—	14.8	165	0.9
	10.000	20.000	15.6	172	1.0

$$\left[E_c = 2.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2, E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2, \nu_c = \nu_r = 0.2 \right]$$

鉄筋比1.7%

表 7-6 円筒型内圧試験結果

No.	コンクリート 練上り温度	内 (水) 圧 (kg/cm ²)	ひびわれ発生 応力 (kg/cm ²)	備 考
1	33°	16.5	49.3	配合 360-60kg/m ³ 鉄筋比 2% 試験材令 28日 生コン工場で練混ぜ後、試験 室へ運搬(約1時間)して打設
2	33°	14.0	41.8	
3	30°	17.0	50.8	
4	30°	16.0	47.8	
平均		15.9	47.4	生コン工場で練混ぜ後、打設
5	25°	19.5	58.2	
6	25°	20.0	59.7	

表 7-7 示方配合

NO	Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/A (%)	単位量 (kg / m ³)					
						C	W	S	G	CSA	5L
360 -0	25	14±2	3	45	40	360	158	696	1085	0	3.6
420 -0	"	"	"	"	"	420	185	653	1015	0	4.19
360 -50	"	"	"	"	"	360	158	657	1087	50	3.6
360 -55	"	"	"	"	"	360	158	653	1087	55	3.6
360 -60	"	"	"	"	"	360	158	648	1087	60	3.6
360 -65	"	"	"	"	"	360	158	644	1087	65	3.6
360 -70	"	"	"	"	"	360	158	640	1087	70	3.6

表 7-8 温度特性値一覧

試験体	種別	測定点	温度上昇		最高温度		温度降下	
			開始時間 (時一分)	平均昇温 速度 (℃/hr)	到達時間 (時一分)	最高温度 (△T℃)	平均降温 速度 (℃/hr)	冷却所要 時間 (時一分)
膨張	NPC	中央	5-30	0.30	15-00	3	0.21	14-00
	CSA	中央	5-30	0.40	15-00	4	0.28	14-00
梁	NPC	上端	4-30	0.50	11-30	3	0.21	28-00
		中央	3-30	0.54	10-00	4	0.29	34-00
		下端	3-00	0.71	10-00	5	0.33	32-00
	CSA	上端	0-30	2.28	11-00	24	0.85	31-00
		中央	0-30	2.52	11-00	26.5	0.92	31-00
		下端	0-30	2.58	10-00	24.5	0.83	32-00
マスコンモデル	60x60 x150 (CSA)	1	00	3.11	13-00	40.5	0.40	105-00
		2	00		測温体破損			
		3	00	2.39	9-00	21.5	0.39	78-00
		4	00	2.96	13-00	38.5	0.39	105-00
		5	00	3.27	11-00	36.0	0.37	92-00
	70x70 x150 (CSA)	1	00	4.09	11-00	45.0	0.34	160-00
		2	00	3.82	11-00	42.0	0.41	127-00
		3	00	2.89	9-00	26.0	0.53	64-00
		4	00	3.82	11-00	42.0	0.33	160-00
		5	00	4.31	8-00	34.5	0.27	152-00

NPC : 360-0の配合の膨張材無混入コンクリート

CSA : 360-0 混入コンクリート

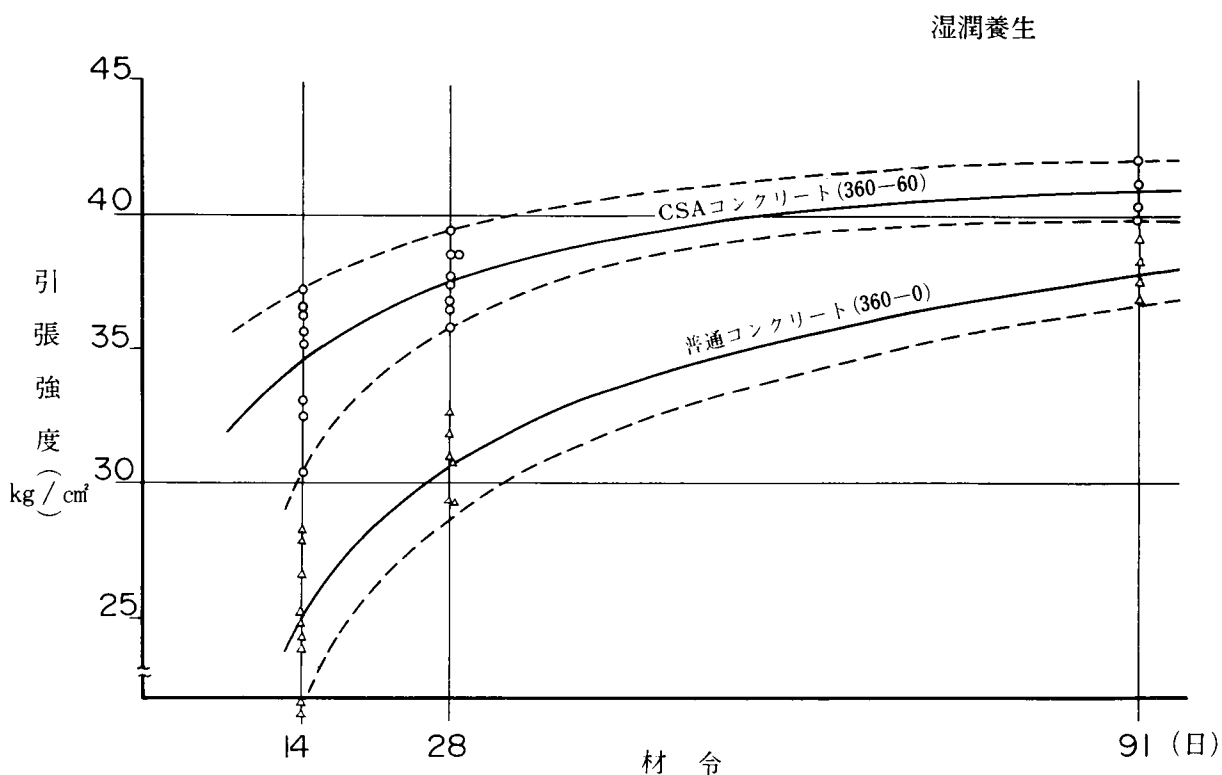


図 7-1 コンクリートの引張試験結果

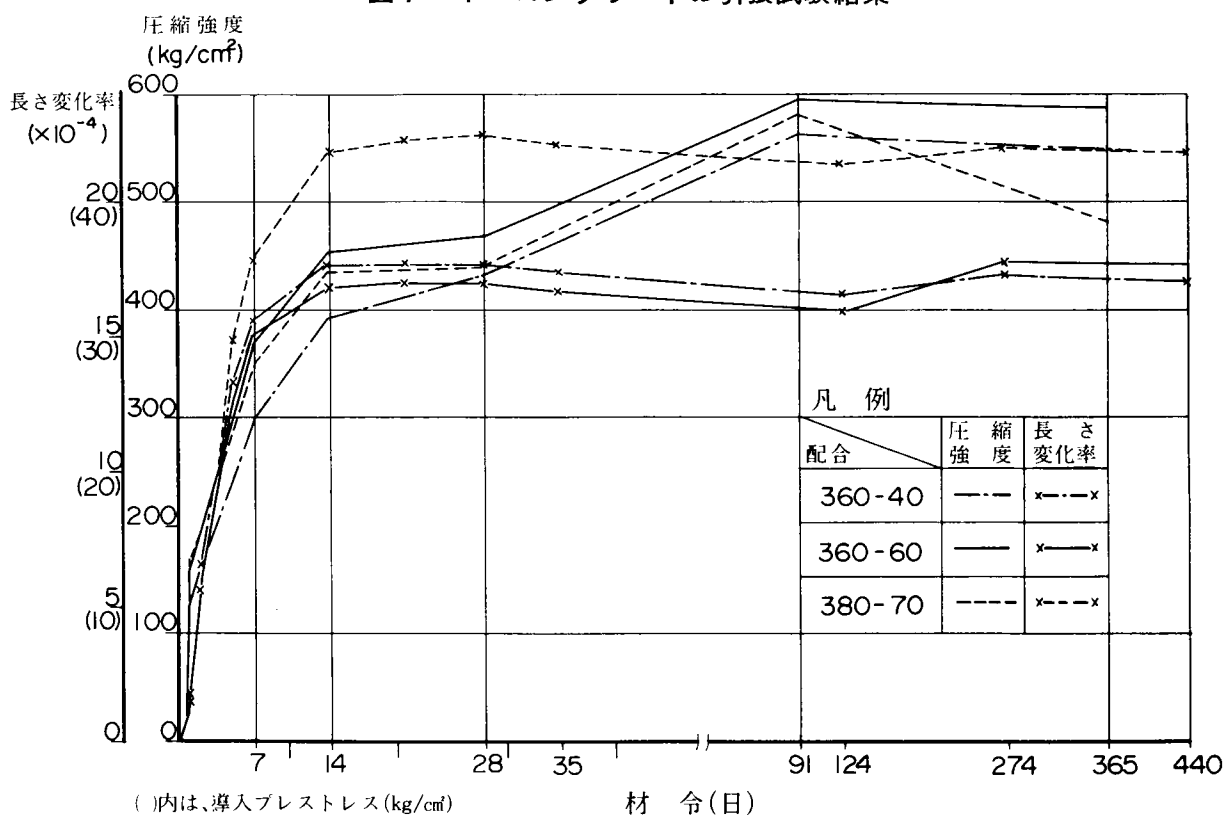


図 7-2 コンクリートの圧縮強度、長さ変化率

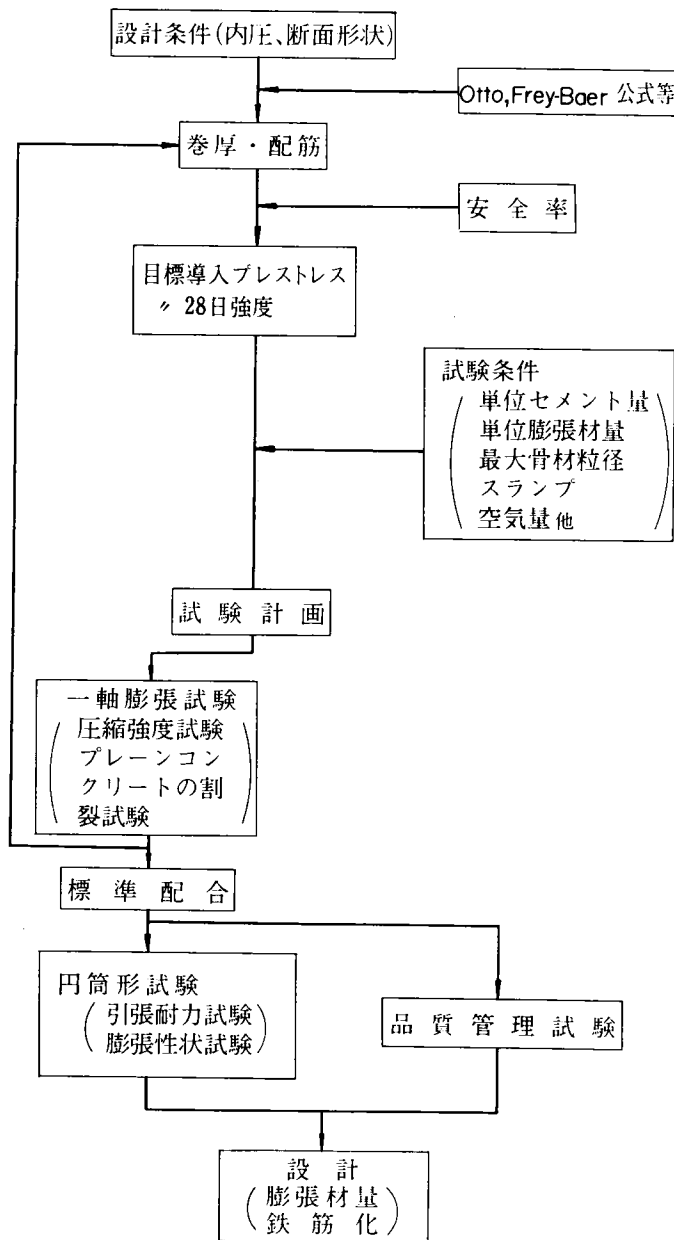


図 7-3 実験による設計方法

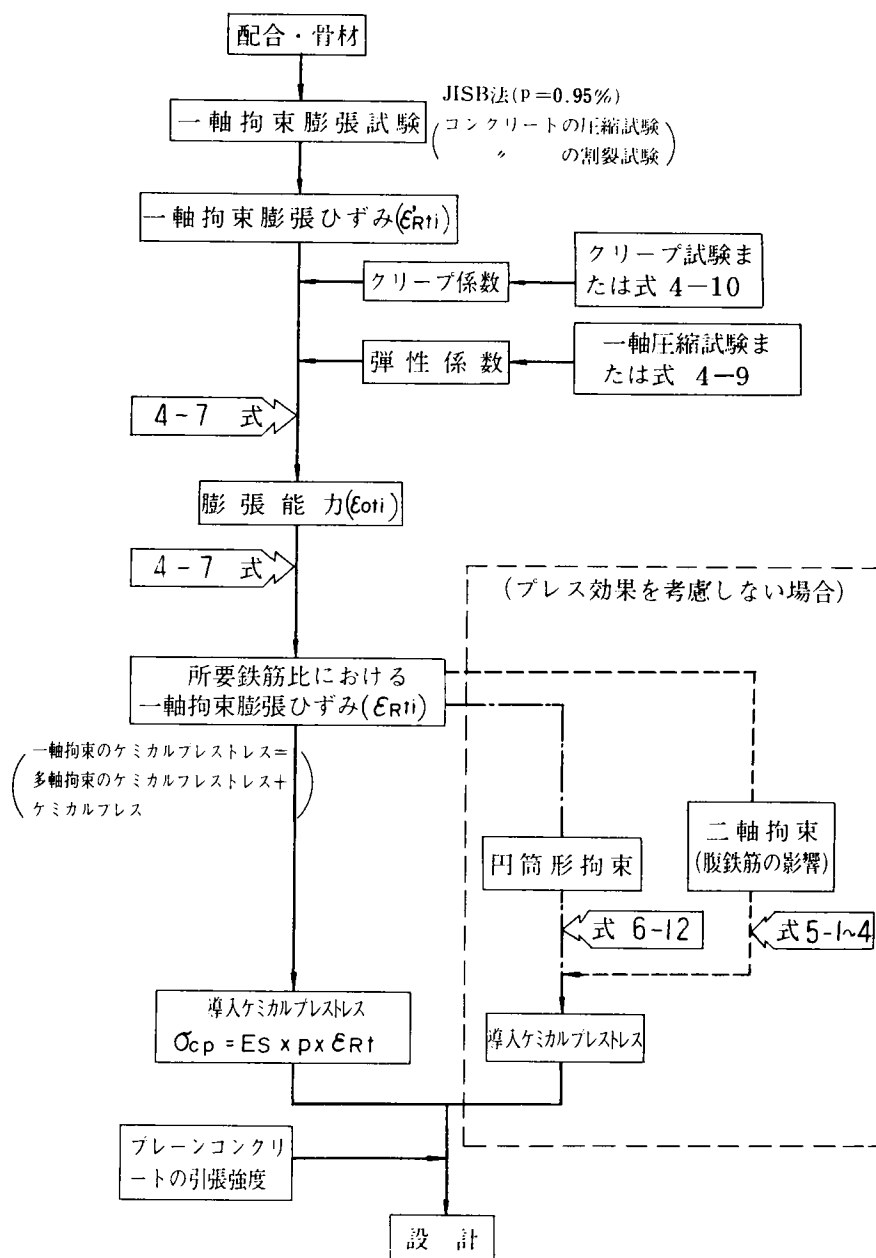


図 7-4 理論による設計方法

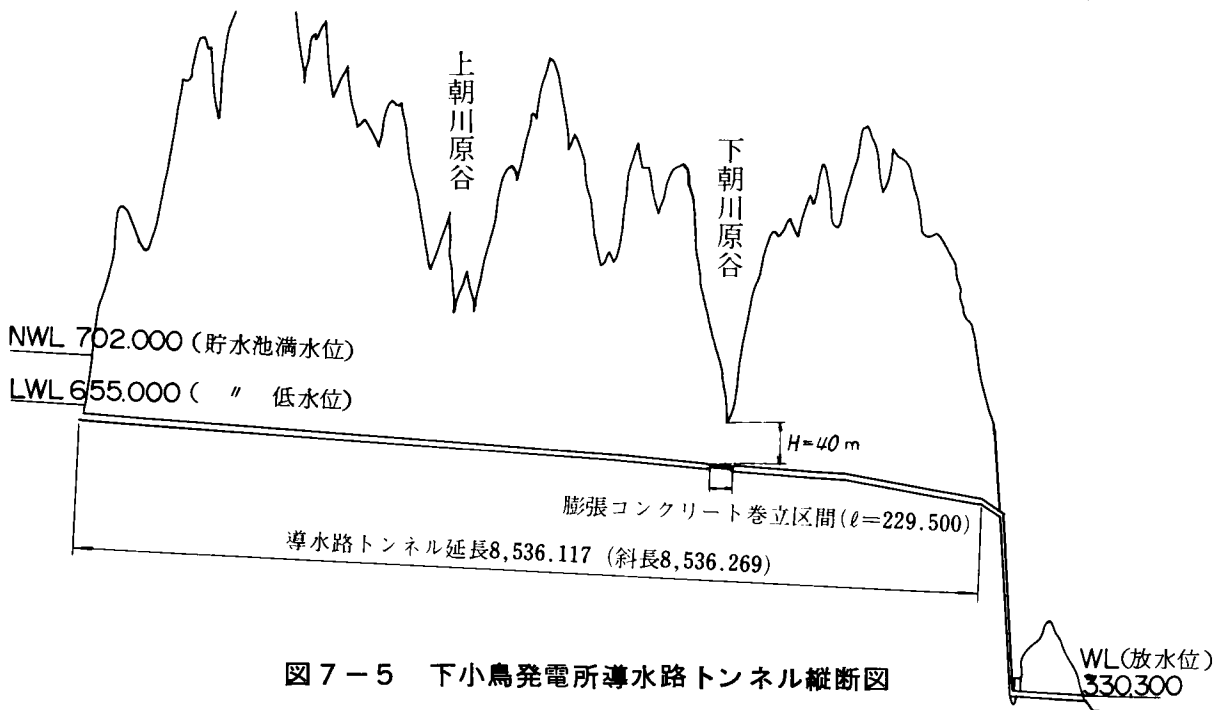


図 7-5 下小鳥発電所導水路トンネル縦断面図

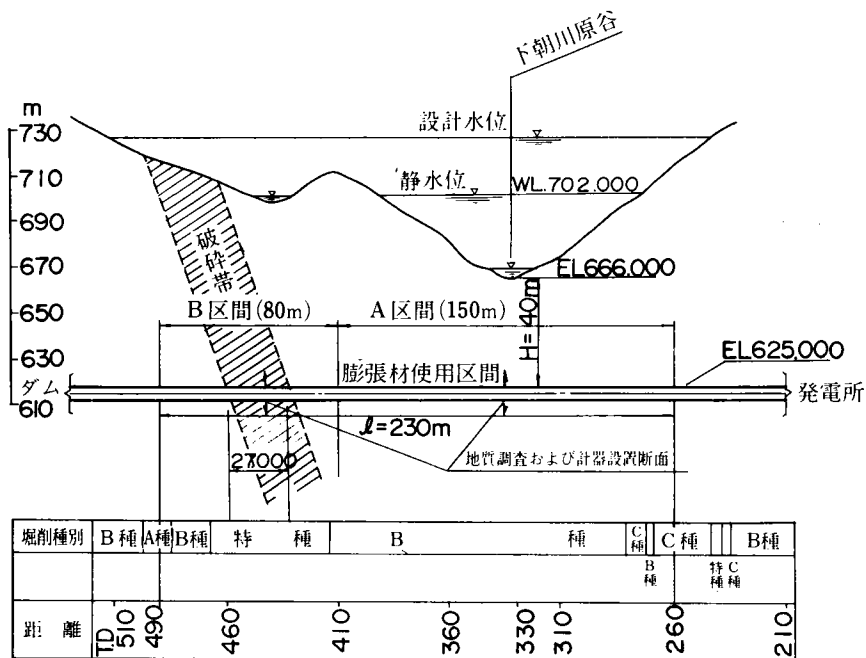


図 7-6 膨張コンクリート使用区間の縦断面図

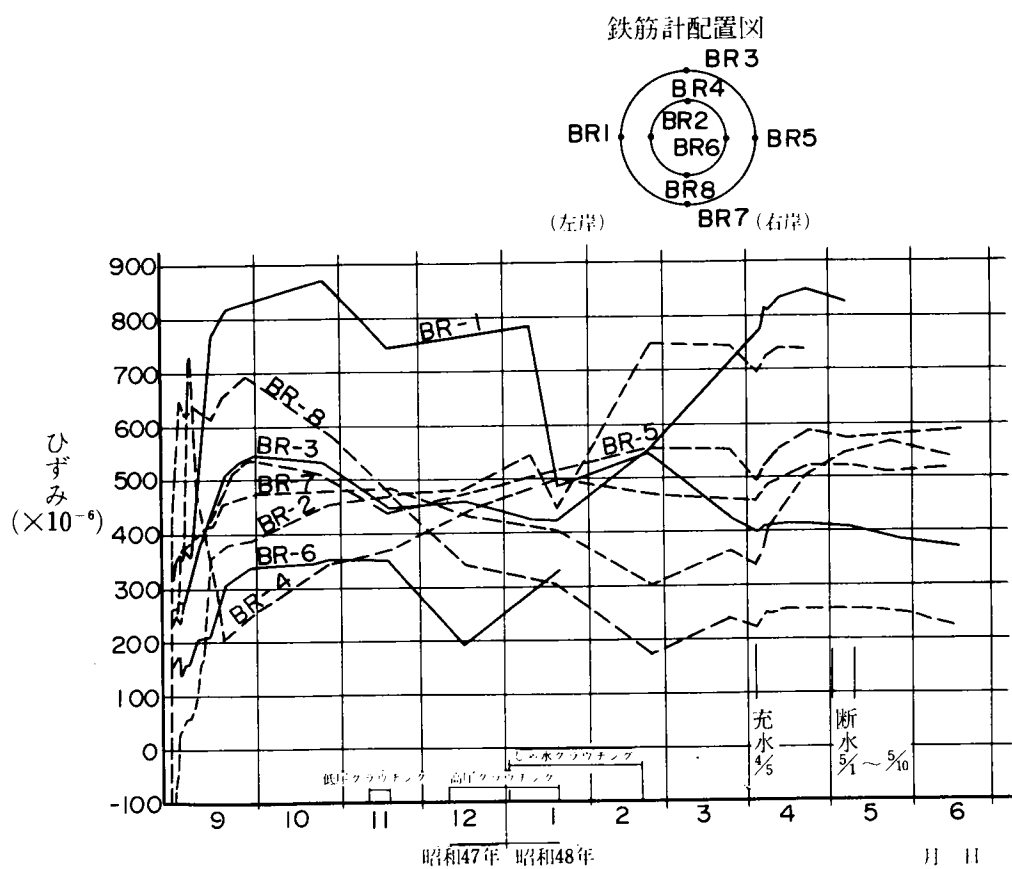
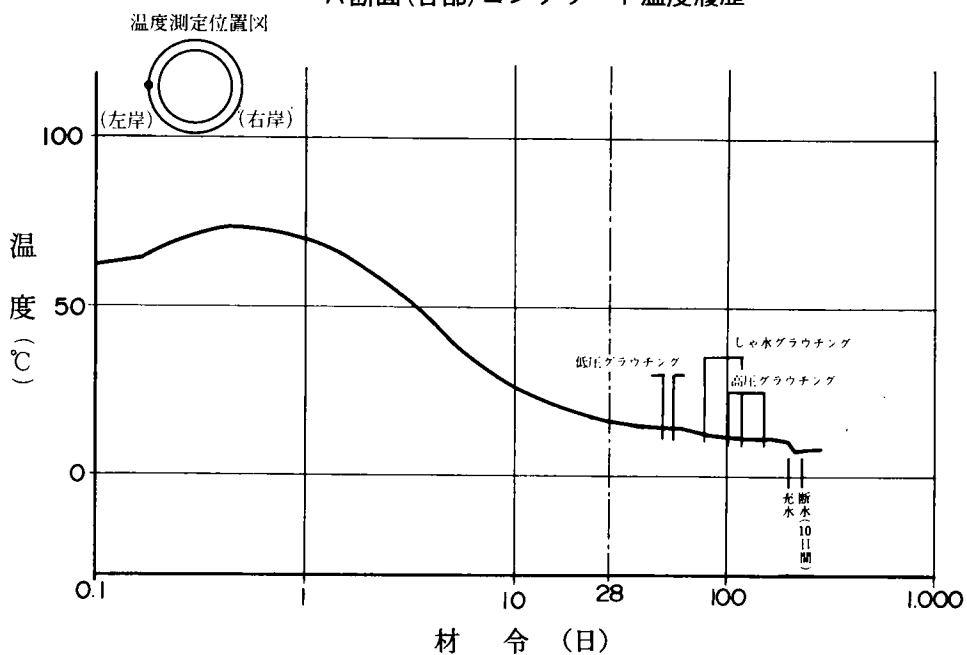


図7-7 膨張コンクリートのひずみ計測結果 (B断面)

A断面(谷部)コンクリート温度履歴



B断面(破碎帯)コンクリート温度履歴

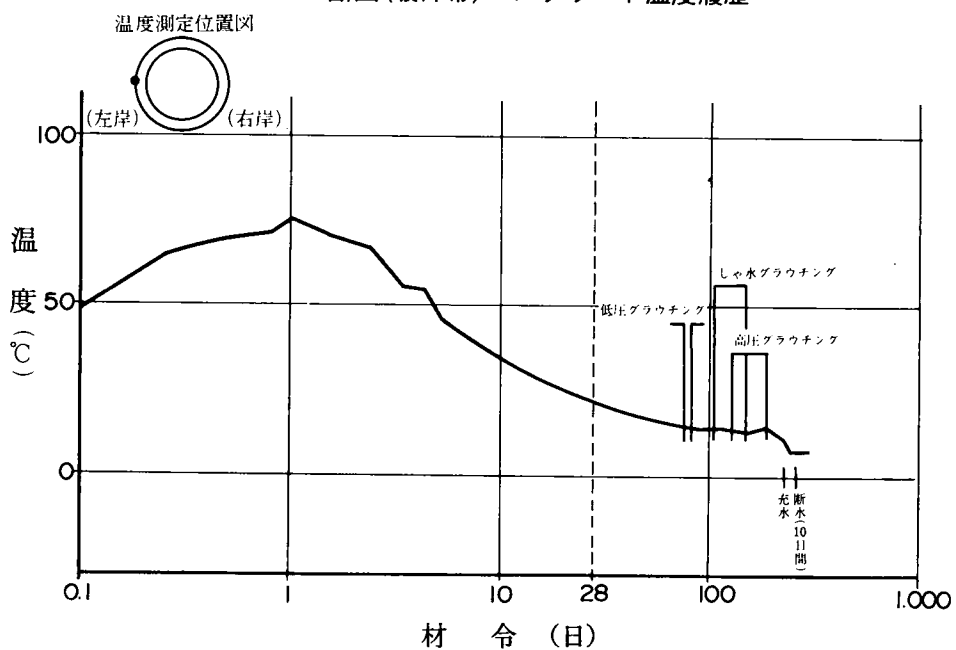


図7-8 コンクリート温度測定結果

地質凡例

	閃 緑 岩
⊞	石 灰 岩
× × × ×	紅色花崗岩
—	破 碎 帶

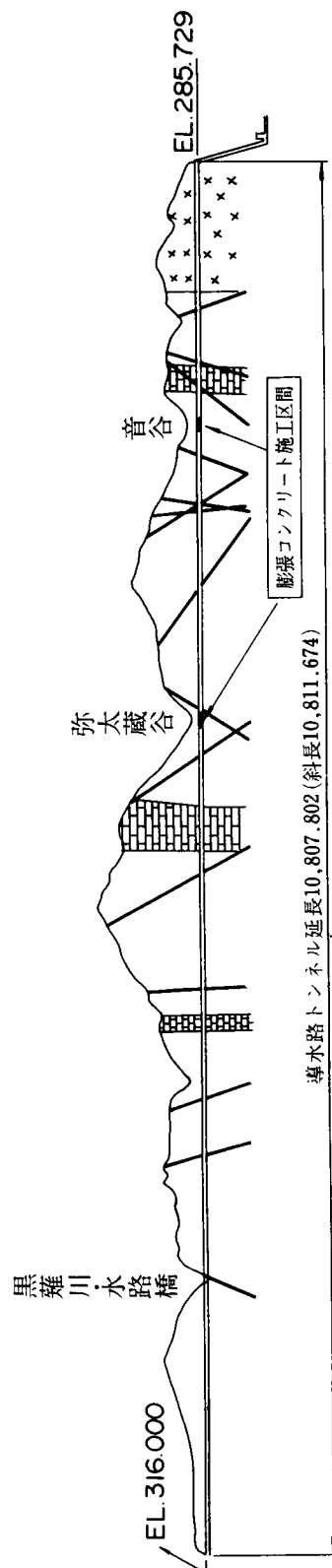


図 7-9 S 発電所導水路トンネル縦断面図

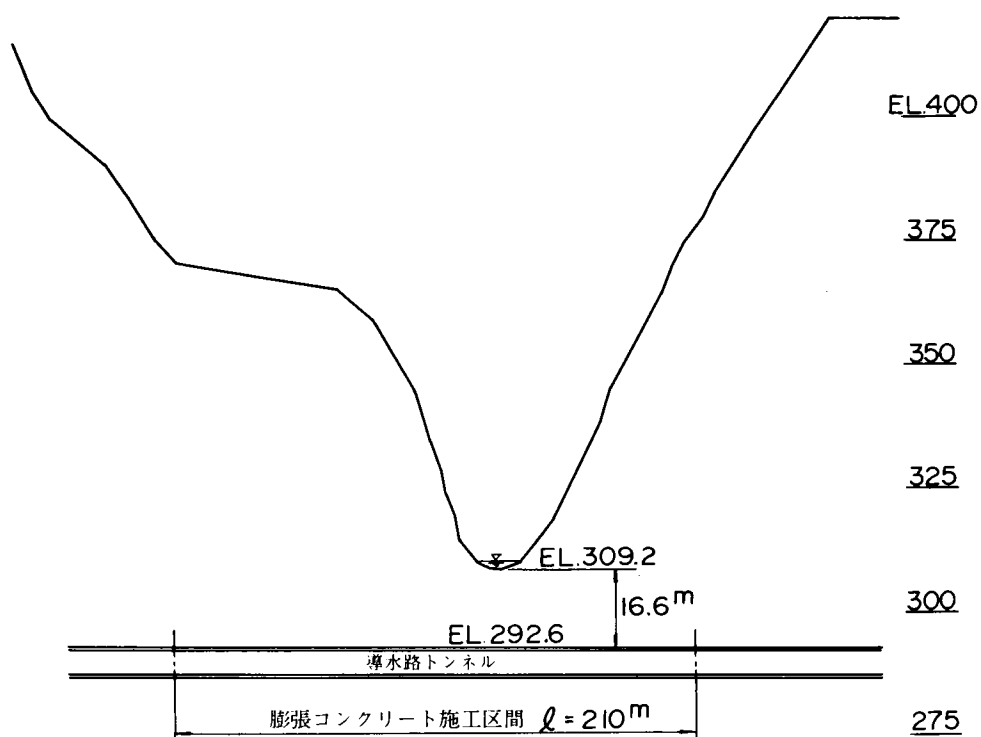


図7-10 音谷地点縦断面図

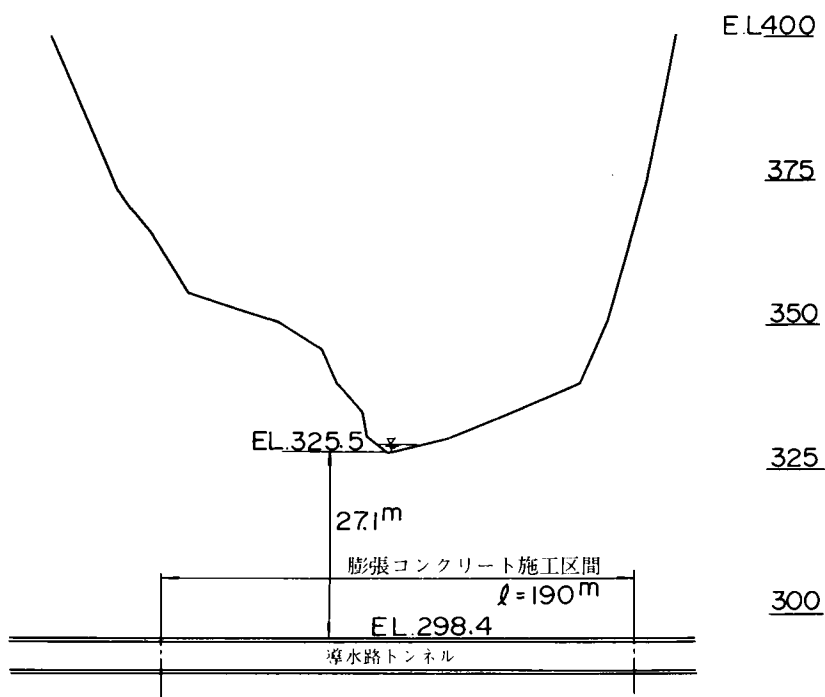


図7-11 弥太蔵谷地点縦断面図

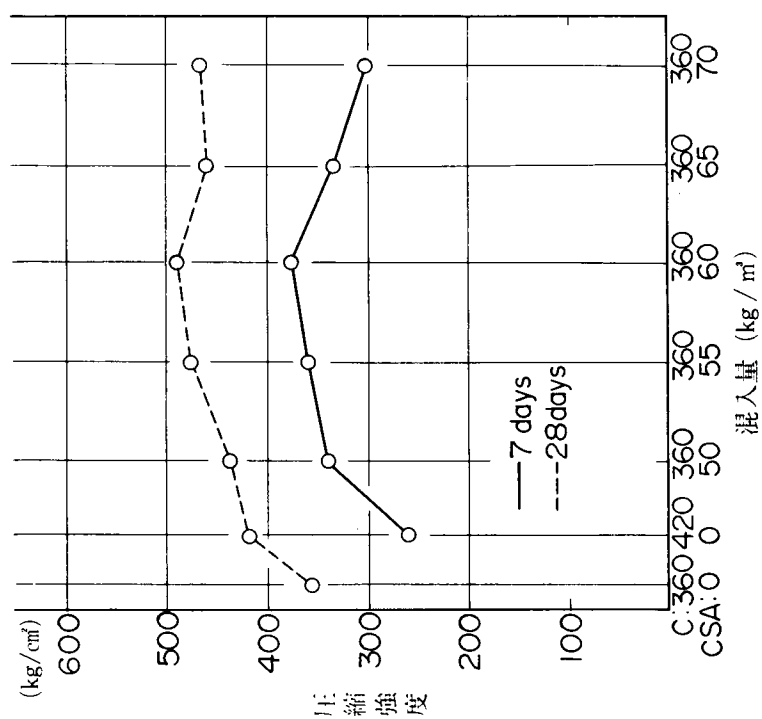


図 7-12 膨張材混入量と圧縮強度の関係

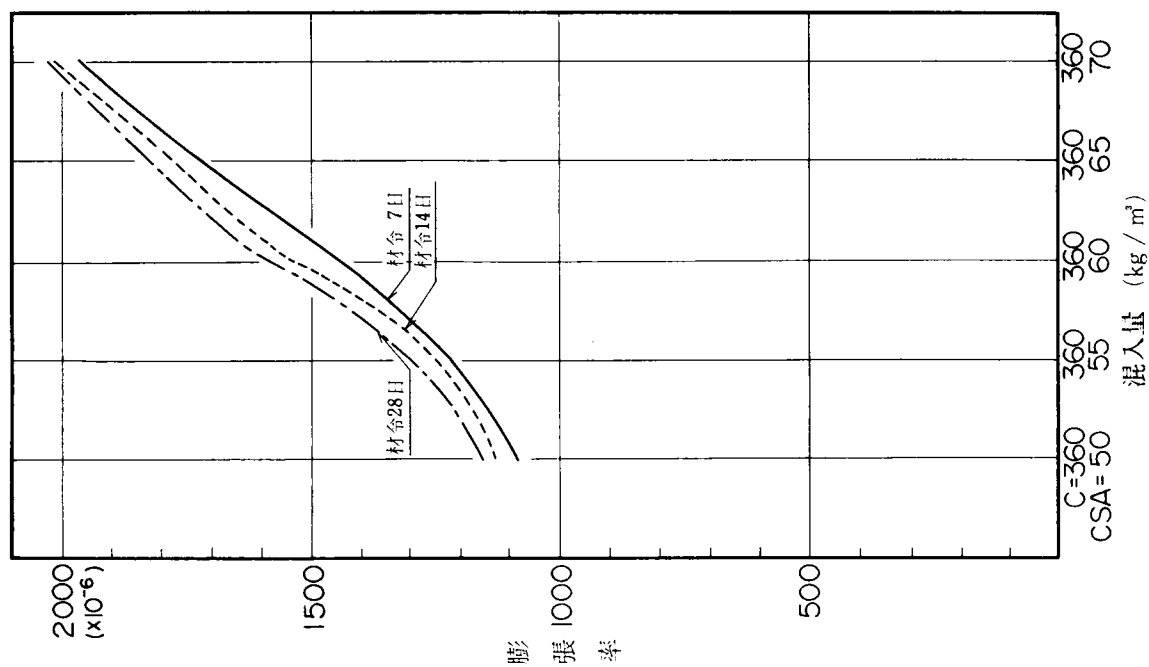


図 7-13 膨張材混入量と膨張率の関係

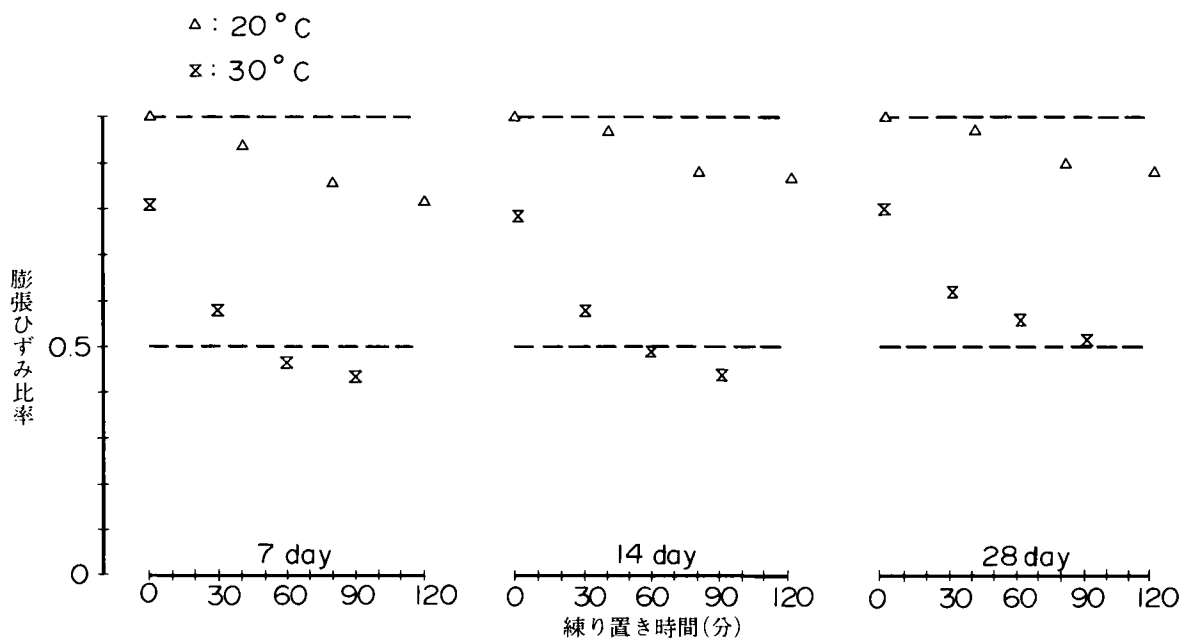


図 7-14 膨張ひずみ比率～練置時間(20°C 0分を1とした場合の膨張ひずみ比率)

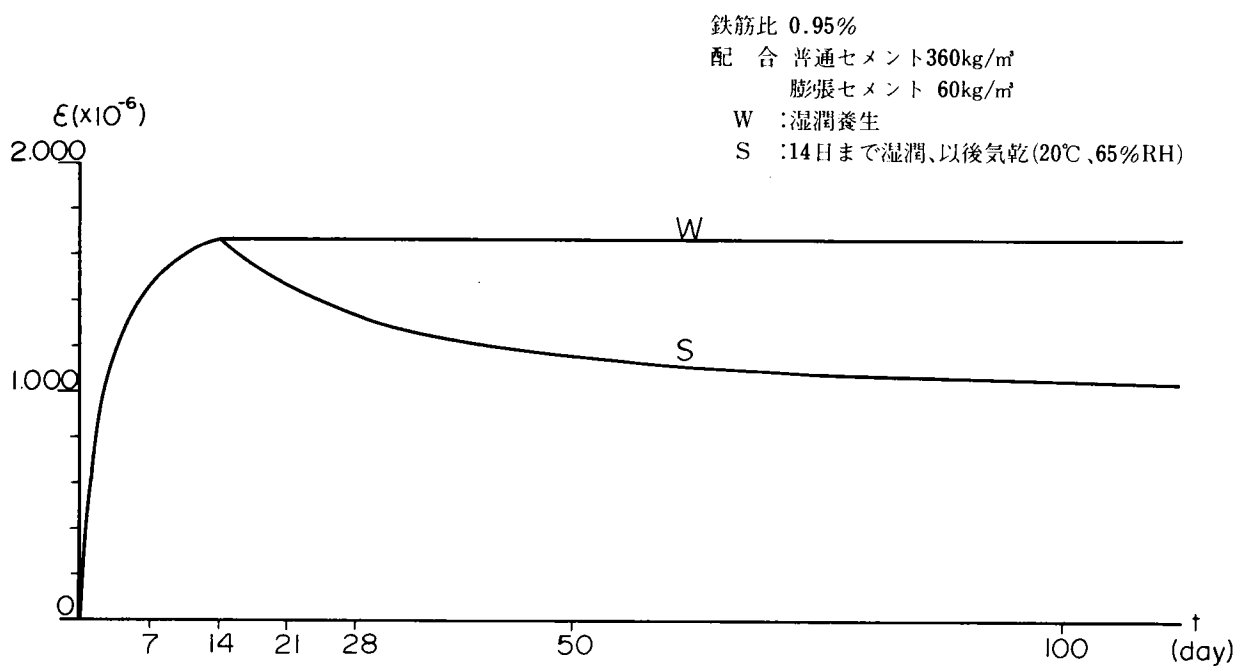


図 7-15 鉄筋ひずみ～時間(拘束膨張試験)

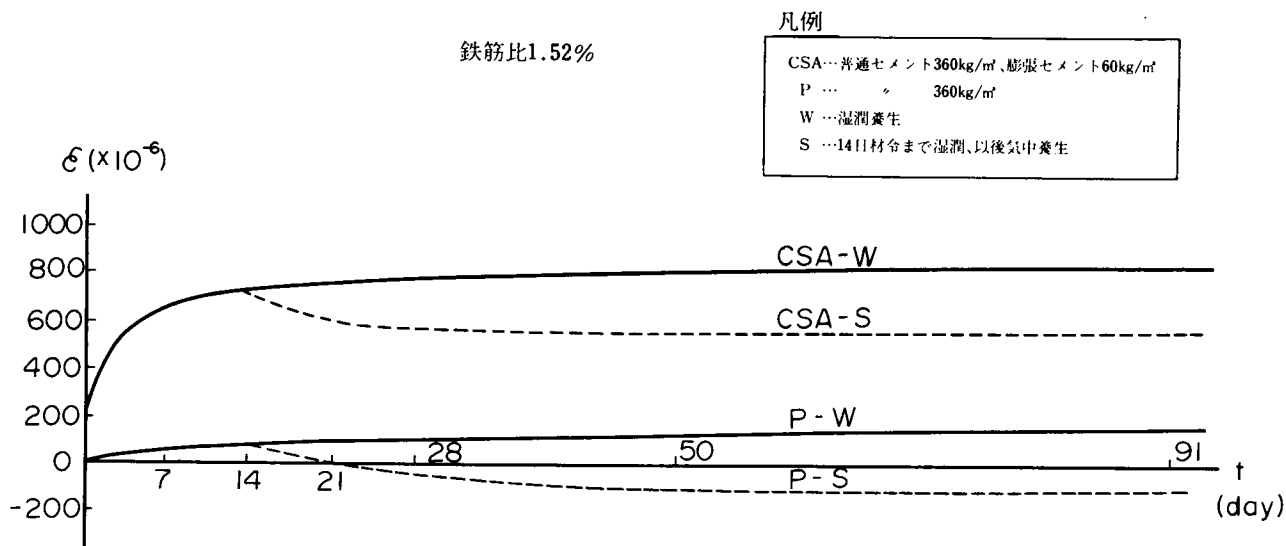
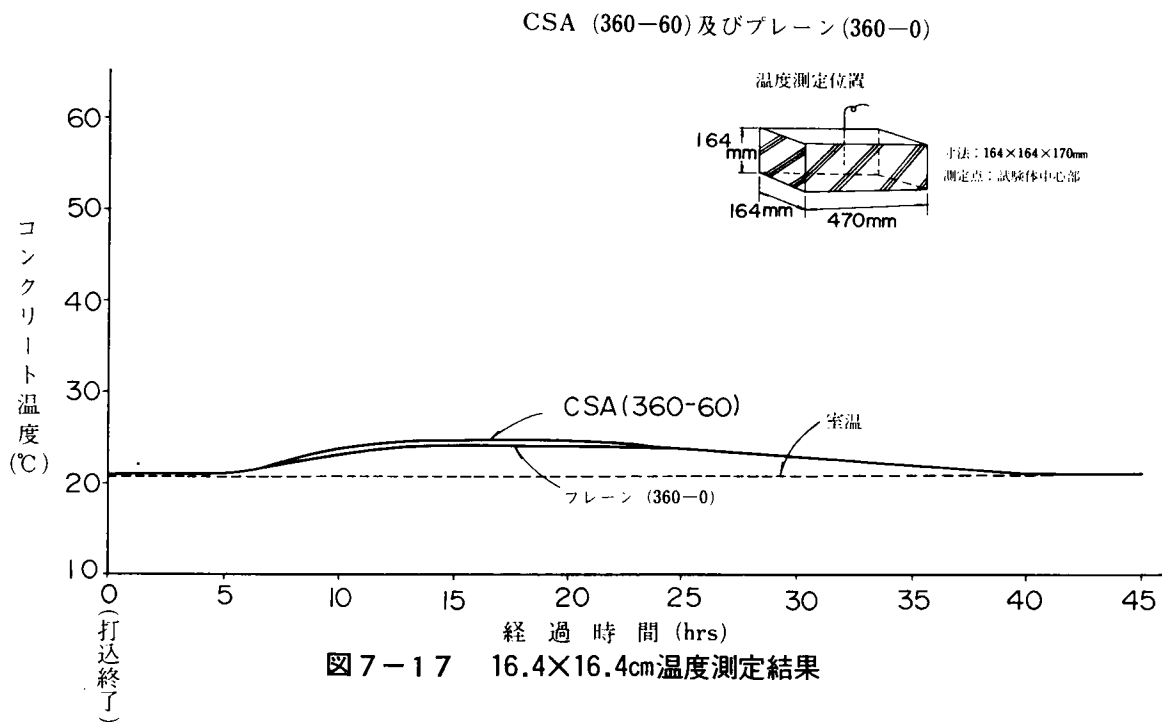
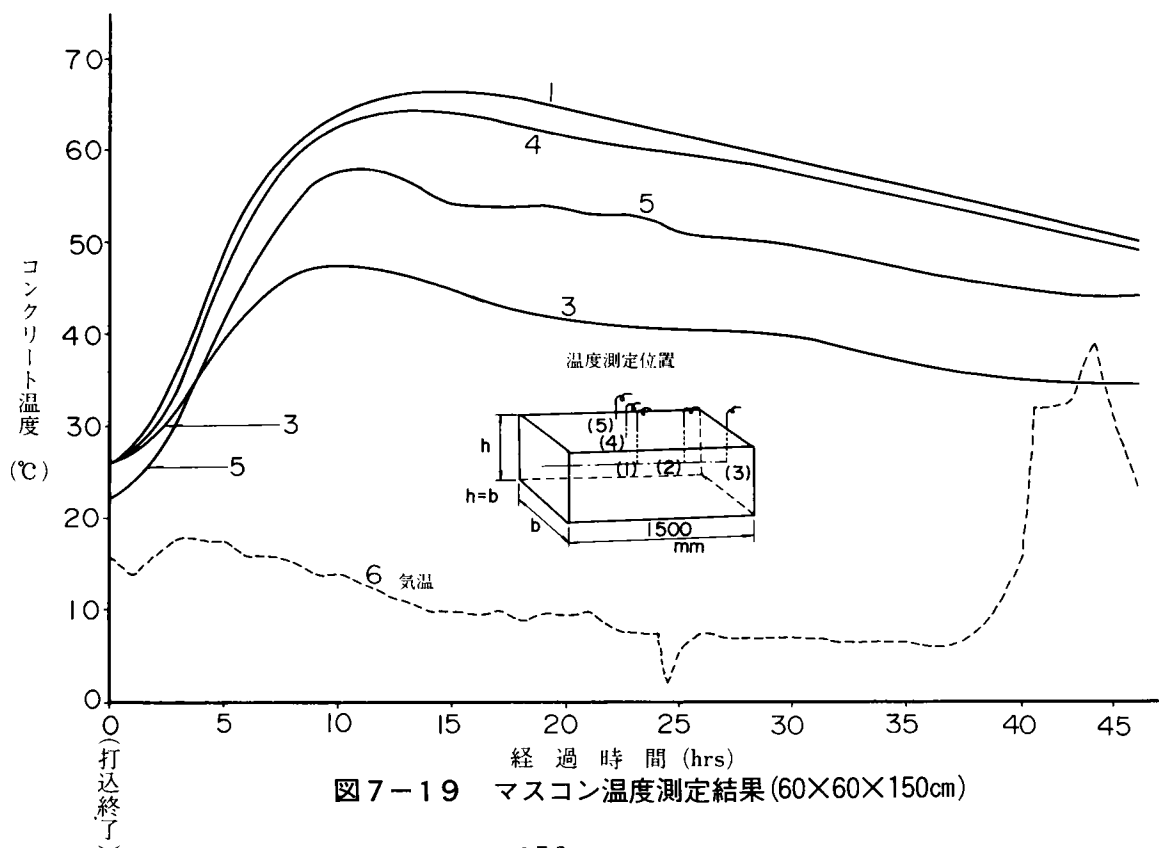
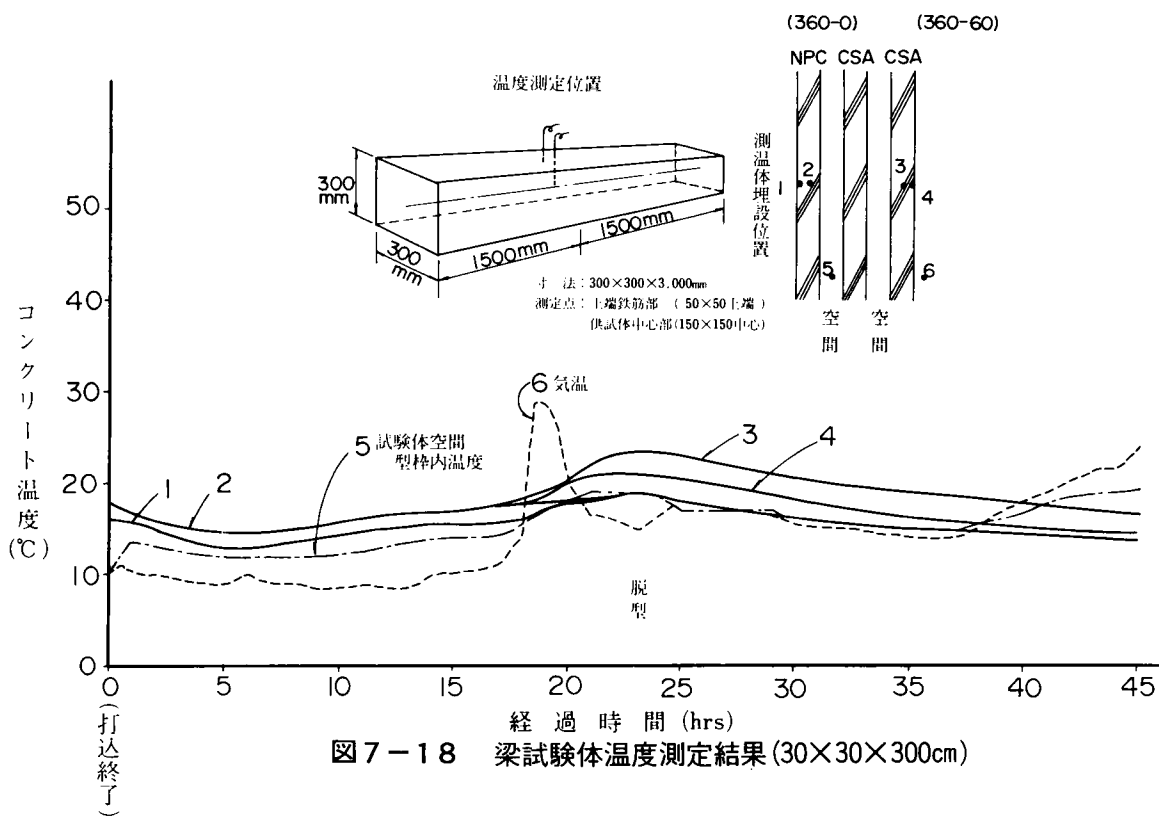


図7-16 鉄筋ひずみ～時間(梁試験)





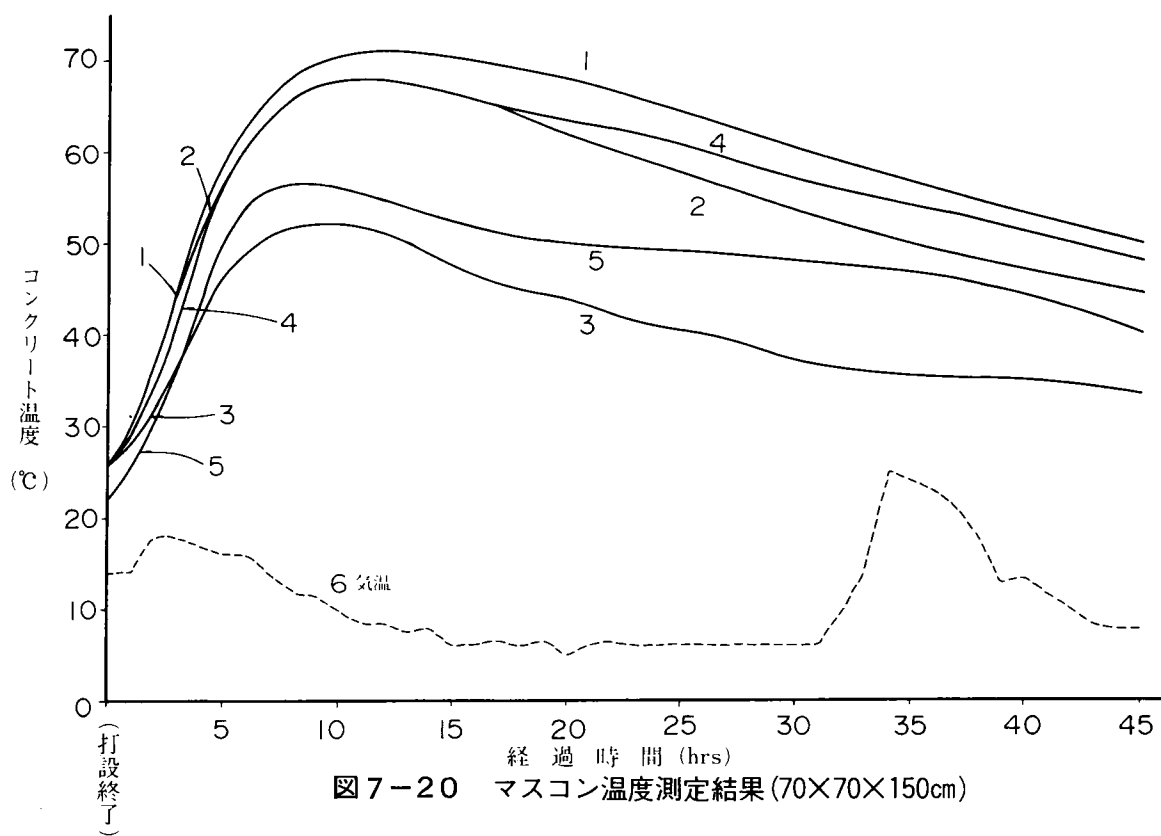


図 7-20 マスコン温度測定結果 (70×70×150cm)

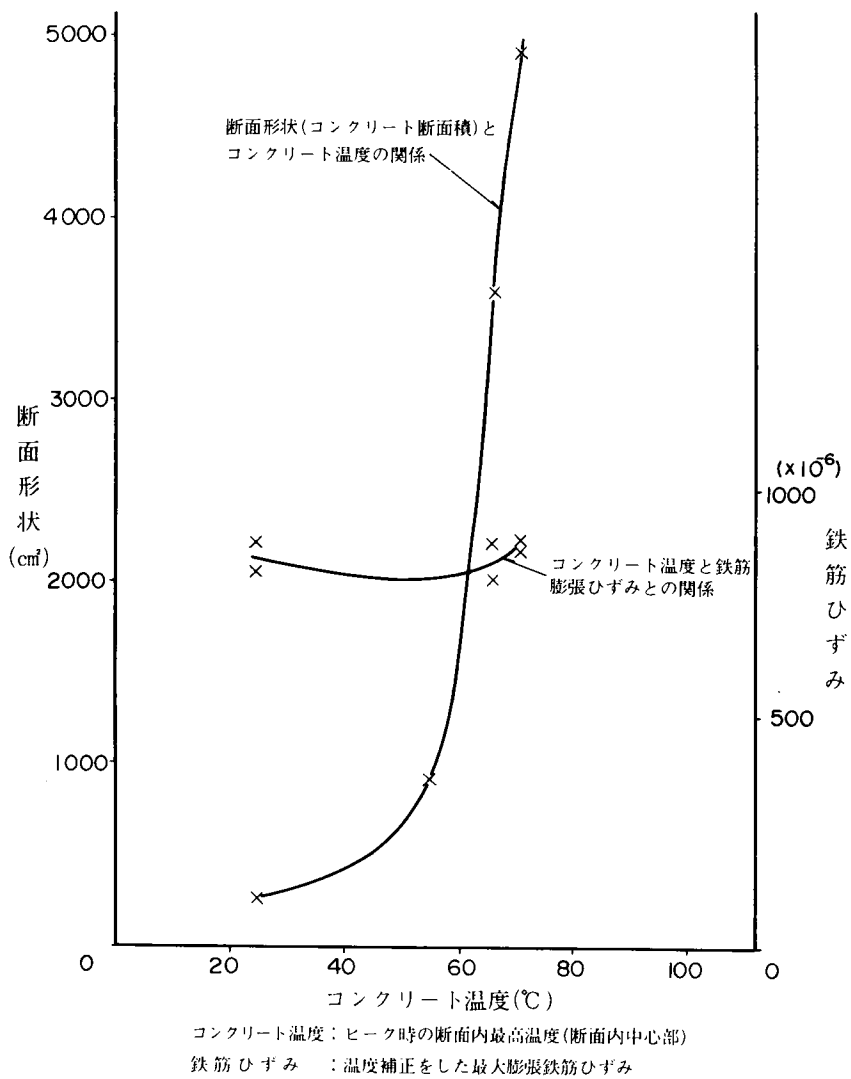


図7-21 コンクリート温度と断面積
とピーク時の鉄筋ひずみとの関係

第 8 章 結 論

本研究は、膨張コンクリートを圧力水路トンネルに適用する場合の基礎的な事項について明らかにするため、一連の実験を実施し、膨張コンクリートの設計方法を提案したものである。

以下に本研究により得られた結果を要約し本論文の結論とするとともに、今後の検討事項についても述べることにする。

本論文ではまず第 1 章において水力発電用導水路トンネルへ膨張コンクリートを適用することの意義にふれて、今後も適用の可能性があることを示し本研究の動機を述べるとともに本論文の概要を示した。第 2 章では、圧力トンネルの漏水防止工法について従来の工法、研究を述べ、また膨張材、膨張コンクリートのケミカルプレストレスについて既往の研究成果を紹介した。

第 3 章では膨張コンクリートの力学的特性について、適正配合を決定し、はり供試体におけるケミカルプレストレスの効果、膨張コンクリートの弾性係数、クリープ係数について検討した。

その結果、配合に関しては単位セメント量と単位膨張材量（いずれも kg/m^3 ）の比が 360:60 の配合でケミカルプレストレスが 20～25 % 程度導入できることが確認された。

はり載荷試験からはケミカルプレストレス量が、拘束膨張ひずみ、鉄筋比および鉄筋弾性係数の積で算出でき、またこのケミカルプレストレスは部材内で機械的に与えられたプレストレスと同様に考えてよいことが確認された。

膨張コンクリートの弾性係数については、普通コンクリートと同様に時間関数として表示でき、また型枠拘束供試体と一軸拘束供試体で大差がないことが明らかになった。

膨張コンクリートのクリープについては、膨張途上におけるケミカルプレストレスによるクリープ（膨張クリープ）と膨張が平衡状態に到ってからの外力によるクリープ（外力クリープ）に分けて考えるべきであり、前者についてはクリープ係数を時間の関数としてとらえる方法を示し、後者については普通コ

ンクリートと大差ないことを明らかにした。

第4章では一軸拘束下での膨張コンクリートに導入されるケミカルプレストレスを推定するために、拘束膨張ひずみの理論的算出方法を提案するとともに実験的な検討を行った。提案式は、弾性係数、クリープ係数を時間の関数として近似し、従来の実測自由膨張ひずみをもとにしている算出法に対して、これを理論的に求めている（膨張能力）点が特徴である。本研究においてはケミカルプレストレスの推定を行うために、ある標準鉄筋比を選定し、一軸拘束ひずみを実験で求め、その値を使用して任意の鉄筋比を有する他の膨張コンクリート（ただし配合は一定）の一軸拘束膨張ひずみを算定する理論式を提案した。

第5章では二軸拘束下への膨張コンクリートの特性に関して理論・実験の両面から検討を行った。

その結果、理論的に二軸拘束下の拘束膨張ひずみを把える場合、第4章で提案した式に直角方向からの影響を考慮することで把えられた。また、腹筋／主筋の比が10～50%の範囲では、腹筋が主筋の膨張ひずみに与える影響は顕著ではないことが明らかになった。さらに、二軸拘束の成立条件に関し、異形鉄筋の付着のみでは不完全な拘束しか与えられず、端板を用いた拘束が必要であることが明らかとなった。

また、二軸拘束を与えるとコンクリートにはケミカルプレストレスが導入されるだけでなく、強度自体の向上（プレス効果）があることが確認された。

第6章では圧力トンネルのモデルとしての円筒型供試体について理論・実験（膨張測定・内、外圧試験）の両面から検討を行った。

その結果、円筒形で主筋ひずみ（円周方向）は同一鉄筋比における一軸拘束のものよりもかなり小さいことが明らかになった。その減少分は円筒型という形からくる形状的な拘束効果であると考え、これを第4章で示した理論式によって解析を試みた。その結果、主筋比が2%の場合には計算ひずみは実測値を精度よく近似したが、1%の場合には実測値よりも大きな値を示した。この原因としては半径方向に導入されるケミカルプレストレスの影響を評価していないためと考えられ、今後の検討課題の一つとしたい。

また、円筒型供試体においても載荷試験からケミカルプレストレスだけでなくケミカルプレスの存在が確認され、両者の和は一軸拘束下のケミカルプレストレス量と同等あるいはそれ以上の値となることが明らかとなった。

第7章では膨張コンクリートを圧力トンネルへ適用するにあたってその設計上の考え方を示すとともに、過去の適用例（下小島発電所）をあげて施工上の留意点にも言及した。下小島の経験から、留意すべき点をあげると次のような点があげられる。

- 膨張材の混入は工場におけるプレミックスとすること。
- 膨張材の風化作用には十分注意し、現場での保存期間はできるだけ短かく、3ヶ月を越すものは使用しないことが望ましい。
- コンクリートの練り上り温度と打設までの所要時間はケミカルプレストレスに大きな影響を及ぼすので注意する。例えば、練り上り温度30℃、打設までの延滞時間が1時間の場合、実験によれば最大膨張ひずみが50%近くも低下することがある。したがって、練り上り温度は最高25℃程度までに納まるようにするのが望ましい。

トンネルの覆工コンクリートの場合、往々にしてマッシュになることがある。そのような場合、コンクリート内外部の温度差によって生ずる応力により、ひびわれが発生する恐れがある。膨張コンクリートの場合、散水養生は必要不可欠であるが、内部水和熱のピークをすぎた頃（大体打設後1日）から散水するのがよい。

以上のように留意すべき点はいくつかあるものの、内水圧を受ける導水トンネルに対して覆工コンクリートのクラック防止目的で、膨張コンクリートによるケミカルプレストレスを導入することはきわめて有効な工法であると考えられる。それは下小島の実績によっても明らかである。

次に今後の課題として次のようなことがある。すなわち、一般に圧力トンネルは周辺岩盤と一体となって挙動すると考えて弾性体として設計している。したがって、周辺岩盤の拘束をも考慮しないことには実際の挙動に合った設計と云いがたいが、現在は周辺岩盤の拘束力を0として設計する場合が多い。そ

の理由は岩盤の物性の把握が困難であるからであって、本研究においても周辺の拘束はないものとして検討をした。しかし現実には相当な周辺岩盤からの拘束があるものと推定せられ、内圧の一部を負担することは想像にかたくないところである。このことは“より経済的な設計”につながるであろう。膨張コンクリートを圧力トンネルに適用する上で将来の大きな課題はこのことの究明であろうと考える。

今後は計測装置をコンクリートあるいは周辺岩盤に埋設してデータを蓄積し、かつ試験室における綿密なる実験研究が必要であると考ええるものである。

本論文の終りにあたり、御指導を頂いた京都大学、岡田清教授、関西電力㈱副社長吉田登氏ならびに御協力頂いた京都大学土木工学教室岡田研究室、大成建設㈱太田誠氏、関西電力㈱取締役近藤信昭氏、全東海支社中村幾雄氏、全建設部矢田篤氏、㈱新日本技術コンサルタント小森久信氏、片平洋氏、電気化学工業㈱青海工場第1研究室中川晃次主任研究員、中谷清一氏、新日鉄化学㈱永渕強氏ならびに下小島建設工事における膨張コンクリート工事に従事された関西電力㈱、電気化学工業㈱の諸志に厚く御礼申上げる次第である。